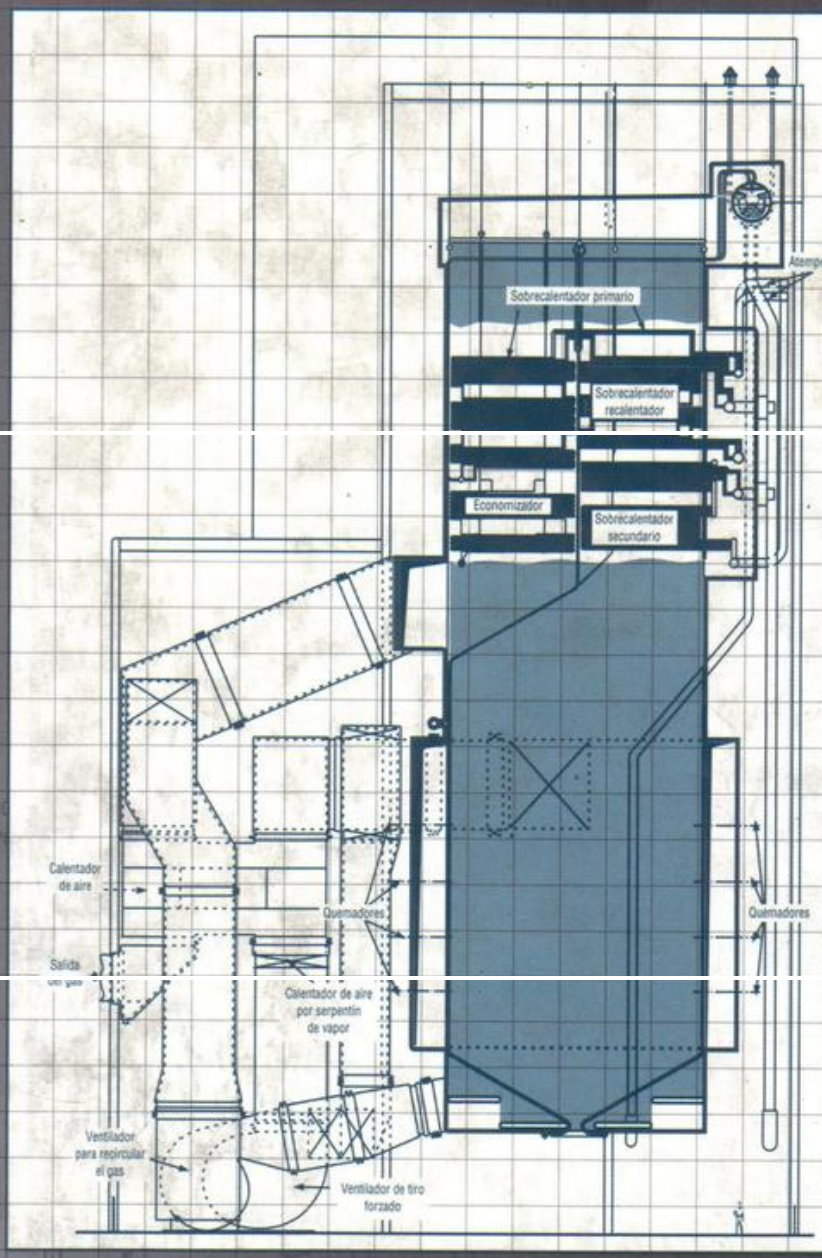
MANUAL DE CALDERAS

Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas



- Mantenimiento
- Construcción
- Instalación
- Reparación
- Seguridad
- Requerimientos
- Normativas

ANTHONY L. KOHAN

Volumen I

Mc Graw Hill

MANUAL DE CALDERAS

Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas

Volumen I

El autor

Anthony Lawrence Kohan. Es un consultor con más de treinta años de experiencia como técnico, probador e inspector de calderas, recipientes a presión y maquinaria. Fue el gerente de la rama especial de calderas y maquinaria técnica en la Compañía de Seguros Royal Insurance. Es autor o coautor de varios libros sobre esta temática. Miembro de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos. Inspector comisionado de National Board. Diplomado en Seguridad Profesional. Miembro de la Sociedad Nacional de Ingenieros Profesionales. Miembro de la Sociedad Americana de la Soldadura.

El libro

Esta nueva edición de una guía clásica ofrece información experimentada sobre los últimos métodos, materiales y equipo para instalar, operar y mantener calderas en instalaciones industriales, comerciales y otras. Está ampliada con nuevos problemas–tipo resueltos y alrededor de doscientas ilustraciones.

Incluye los recientes avances tecnológicos y el uso de nuevos materiales en la construcción de calderas. Asimismo encontramos nuevos cálculos de rendimiento y eficiencia, detalles sobre nuevos controles, sensores, transmisores y actuadores para operaciones de calderas, nuevas técnicas de inspección, indicadores para un buen funcionamiento de las plantas de ciclo combinado, guía sobre normas de calidad ISO 9000 y mucho más. Todo ello con gran cantidad de preguntas y respuestas revisadas al final de cada capítulo.

Contenido

- Sistemas de Calderas. Clasificaciones y prácticas de operación fundamentales
- Calderas de tubos de humos y de agua
- Calderas eléctricas y de aplicaciones especiales
- Generadores de vapor de plantas nucleares
- Estructura de los materiales, códigos y especificaciones requeridas de los materiales
- Fabricación por soldadura y técnicas NDT (no destructivas)
- Material de ensayos, tensiones y efectos de servicio
- Cálculos de resistencia, tensiones y presiones admisibles
- Conexiones, accesorios y controles de las calderas
- Combustión, quemadores, controles y sistemas de seguridad de llama. Proceso básico de combustión
- Equipos auxiliares de caldera y equipo externo de tratamiento de agua
- Problemas y tratamiento del agua de caldera
- Problemas de servicio, inspección, mantenimiento y reparaciones
- Entrenamiento y funcionamiento de la planta de calderas y monitorización del rendimiento

9 788448 128012

McGraw-Hill Interamericana de España, S. A. U.

A Subsidiary of The McGraw-Hill Companies

http://www.mcgraw-hill.es

ISBN: 84-481-2801-X

MANUALES McGRAW-HILL DE INGENIERÍA

9701022637 AMSTOCK. *Manual del vidrio en la construcción*
9701003888 AUSTIN. *Manual de procesos químicos en la industria*
9701006925 BAUMEISTER. *Manual del ingeniero mecánico*
9586006675 BROKENBROUGH. *Manual de diseño de estructuras de acero*
9701017811 CAMPANELLA. *Fundamentos de los costos de producción de la calidad*
9701013425 CASCIO. *Guía ISO 14000*
8448114671 CHOMYCZ. *Instalaciones de fibra óptica*
8448121023 CLARK. *Análisis y gestión energética de edificios*
9701013417 CLEMENTS. *Prepare a su empresa para el sistema de calidad QS-9000*
0070791627 COLLAZO. *Diccionario enciclopédico de términos técnicos inglés/español-español/inglés. 3 volúmenes*
8448112067 CORBASI. *Sistemas de navegación (GPS)*
9701016823 DE NEVERS. *Ingeniería de control de la contaminación del aire*
9701008715 FINK. *Manual de ingeniería eléctrica.* 2 volúmenes
9701018893 FREEMAN. *Manual de prevención de la contaminación industrial*
9586009866 GAYNOR. *Manual de gestión en tecnología*
9701023994 GONZÁLEZ. *ISO 9000, QS 9000 e ISO 14000. Normas y requerimientos*
8448106636 GRIMM. *Manual de diseño de calefacción, ventilación y aire acondicionado*
8448116194 HARRIS. *Manual de medidas acústicas y control del ruido*
9701016769 HICKS. *Manual de cálculos para las ingenierías.* 3.ª ed.
8448100557 JURAN. *Manual de control de calidad.* 4.ª ed. 2 volúmenes
970101958X KOLLURU. *Manual de evaluación y administración de riesgos*
9701008243 LANE. *Control de incrustaciones y corrosión en instalaciones hidráulicas en edificios*

9701014030 LEVY. *Administración de proyectos de construcción*
9701009177 MACLEAN. *Documentación de calidad para ISO 9000*
8448127285 MARCO. *Curso básico de cálculo y diseño de estructuras*
8448112059 MARCO. *Fundamentos para el cálculo y diseño de estructuras metálicas*
9701010574 MAYNARD. *Manual del ingeniero industrial.* 4.ª ed.
9701022491 MERRITT. *Manual del ingeniero civil.* 4.ª ed.
9586006689 MERRITT. *Manual integral para diseño y construcción*
8448116070 METCALF. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*
8448115503 METCALF. *Ingeniería de aguas residuales. Redes de alcantarillado y bombeo*
9701022645 PEACH. *Manual de calderas*
9701000110 PERRY. *Manual del ingeniero químico.* 6.ª ed. 2 volúmenes
970101345X PORT. *Guía Nalco para el análisis de fallas en caldera*
970101202X PYZDEK. *Manual de control de calidad en la ingeniería*
9701016831 ROSALER. *Manual del ingeniero de planta.* 2.ª ed.
9701003926 ROSALER. *Manual de mantenimiento industrial.* 2 volúmenes
970101832X SIKICH. *Manual para planificar la administración de emergencias*
8448114329 STORCH. *Manual de seguridad industrial en plantas químicas y petroleras*
9701013433 SOIN. *Control de calidad total*
970101782X TABLA. *Guía para implantar la norma ISO 9000*
9701014677 TEMPLE. *Remodelación de espacios en el hogar*
8448111966 TERES. *VHDL Lenguaje estándar de diseño electrónico*
8448127420 VÉLEZ. *Defensa para la prevención y extinción de incendios*
9701017714 VOEHL. *ISO 9000. Guía de instrumentación para pequeñas y medianas empresas.*
9701012518 WADDELL. *Manual de la construcción con hormigón.* 3.ª ed.

MANUAL DE CALDERAS

Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas

VOLUMEN I

MANUAL DE CALDERAS

Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas

VOLUMEN I

Anthony Lawrence Kohan
Miembro de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
Inspector comisionado del National Board
(comisionado por varios estados)
Diplomado en Seguridad Profesional
Miembro de la Sociedad Nacional de Ingenieros Profesionales
Miembro de la Sociedad Americana de la Soldadura

Traducción y revisión técnica
CLAUDIO MÍGUEZ GÓMEZ
Ingeniero Industrial MBA
Miembro de ASHRAE-ASME

RAMÓN URCELAY Y AZPITARTE
Doctor Ingeniero Electromecánico (ICAI)

MADRID • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA • LISBOA • MÉXICO
NUEVA YORK • PANAMÁ • SAN JUAN • SANTAFÉ DE BOGOTÁ • SANTIAGO • SÃO PAULO
AUCKLAND • HAMBURGO • LONDRES • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI • PARÍS
SAN FRANCISCO • SIDNEY • SINGAPUR • ST. LOUIS • TOKIO • TORONTO

La información contenida en este trabajo ha sido obtenida por McGraw-Hill Incorporated procedente de fuentes dignas de crédito. No obstante, ni McGraw-Hill ni los autores garantizan la exactitud o perfección de la información publicada.

Ni McGraw-Hill ni el autor serán responsables de cualquier error, omisión o daño ocasionados por el uso de esta información. Este trabajo se publica con el reconocimiento expreso de que el autor está proporcionando una información, pero no tratando de prestar ningún tipo de servicio profesional o técnico. Si tal servicio fuera necesario, diríjase a un profesional adecuado para tal fin.

MANUAL DE CALDERAS

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

DERECHOS RESERVADOS © 2000, respecto a la primera edición en español, por
McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U.
Edificio Valrealty
Basauri, 17, 1.ª planta
28023 Aravaca (Madrid)

Traducido de la 4.ª edición en inglés de
BOILER OPERATOR'S GUIDE

ISBN: 0-07-036574-1

Copyright © MCMXCVIII por McGraw-Hill, Inc.

ISBN: 84-481-2801-X (volumen I)
ISBN: 84-481-2800-1 (obra completa)
Depósito legal: M. 22.218-2000

Editor: Antonio García Brage
Cubierta: DIMA
Preimpresión: MonoComp, S. A.
Impreso en EDIGRAFOS, S. A.

IMPRESO EN ESPAÑA - PRINTED IN SPAIN

ACERCA DEL AUTOR

Anthony Kohan es un consultor con más de treinta años de experiencia como técnico, probador e inspector de calderas, recipientes a presión y maquinaria. Fue anteriormente gerente de la rama especial de calderas y maquinaria técnica en la Compañía de Seguros Royal Insurance. Es autor o coautor de:

— *Standard Boiler Room Questions and Answers, Standard.*
— *Heating and Power Boiler Plant Questions and Answers.*
— *Pressure Vessel Systems, and Plant Services and Operations Handbook.*

Todos estos libros han sido publicados por McGraw-Hill.

Dedicado a los operadores de plantas, reparadores, inspectores jurisdiccionales e inspectores de compañías aseguradoras, instaladores, ingenieros de planta y gestores implicados en la previsión de la construcción segura y fiable de calderas, con operación, mantenimiento, inspección y reparaciones de una instalación.

Especial agradecimiento a S. Elonka y S. Beckert por su inspiración y ánimo.

CONTENIDO

Prefacio a la cuarta edición xiii

Abreviaturas y símbolos xv

VOLUMEN I

1. Sistemas de calderas. Clasificaciones y prácticas de operación fundamentales . 1
2. Calderas de tubos de humos 47
3. Calderas de tubos de agua 83
4. Calderas eléctricas y de aplicaciones especiales 131
5. Generadores de vapor de plantas nucleares 165
6. Estructura de los materiales, códigos y especificaciones requeridas de los materiales 193
7. Fabricación por soldadura y técnicas NDT (no destructivas) 219
8. Material de ensayos, tensiones y efectos de servicio 263
9. Cálculos de resistencia, tensiones y presiones admisibles 297
10. Conexiones, accesorios y controles de las calderas 351

VOLUMEN II

11. Combustión, quemadores, controles y sistemas de seguridad de llama. Proceso básico de combustión 409
12. Equipos auxiliares de caldera y equipo externo de tratamiento de agua 475
13. Problemas y tratamiento del agua de caldera 531
14. Problemas de servicio, inspección, mantenimiento y reparaciones 577
15. Entrenamiento y funcionamiento de la planta de calderas y monitorización del rendimiento 645

Apéndice 1. Terminología y definiciones 683

Apéndice 2. Tablas de tratamiento de agua 721
Apéndice 3. Observación de las reglas de seguridad de calderas 727
Apéndice 4. Normativa española 731
Índice 733

PREFACIO A LA CUARTA EDICIÓN

Las operaciones de las instalaciones de planta de calderas de calefacción para edificios normales e instituciones, así como calderas de procesos industriales, continúan estando afectadas por los desarrollos en instrumentación y controles electrónicos, que a su vez producen más automatización de marcha con sus consecuencias y afectan al trabajo y a la seguridad de la operación. Los requerimientos y normativas para controlar las emisiones y descargas están afectando y apremiando también a las modernas operaciones. Esta edición hace énfasis sobre algunos de estos modernos desarrollos.

La cuarta edición continuará intensificando los conceptos básicos fundamentales de los principios operativos, así como también tratará los requerimientos normativos sobre emisiones, construcción e instalación, mantenimiento y reparación, controles con dispositivos de seguridad y la aplicación de las normas del código ASME (última edición) y de la normativa UNE (en España).

Otros desarrollos recientemente incluidos o que están recibiendo una amplia discusión son:

- Impacto potencial sobre el Código de Calderas del programa de la certificación ISO 9.000.
- Combustión con baja relación aire/combustible y métodos control de NO_x.
- Pruebas de espacios confinados según las normas OSHA.
- Rendimiento, prueba de eficiencia y cálculos relacionados.
- Efectos del ideado sobre las unidades carga-base operadas previamente e inspecciones requeridas.
- Evaluaciones económicas en reparaciones o decisiones de reemplazamiento.
- Inspección y operación del generador de vapor recuperador de calor en cogeneración de ciclo combinado.
- Revisiones según Código ASME y National Board.
- Desarrollos en sensores, transmisores y actuadores que son aplicables a la operación automática.
- Elementos auxiliares de caldera, química del tratamiento de agua y ecuaciones químicas.
- Prácticas de seguridad para la planta de calderas.
- Prevención de incendios para la caldera o planta.
- Causas de fallos de los componentes de caldera.

Las preguntas y respuestas prácticas al final de cada cálculo han sido revisadas en todo lo que se refiere a para revisar los sistemas normales de caldera. Sin embargo, algunas preguntas y respuestas sobre los antiguos sistemas de calderas han sido retenidas y conservadas para aquellos lectores que deben prepararse para los exámenes de licencia jurisdiccional o para el examen de inspector del National Board*. Como en ediciones anteriores, los problemas siguen los modelos de estos exámenes, incidiendo en las aplicaciones prácticas y especiales normalmente requeridas.

Muchas sociedades y organizaciones han suministrado dibujos y esquemas así como información de sus productos para esta edición y su ayuda es gratamente reconocida. Se hace mención particular de las revistas POWER, Ingeniería Química e Ingeniería Mecánica, Código ASME de calderas, Inspección Legal del Comité Nacional de Calderas y recipientes a presión, Sociedad Americana de Soldadura, Asociación Nacional de Protección Contra Incendios, Ingeniería Factory Mutual, Aseguradores de Riesgos Industriales, Compañía de Seguros e Inspección Hartford de Calderas de Vapor y varios fabricantes de calderas, así como la Asociación Americana de Fabricantes. Las acreditaciones de las ilustraciones y figuras se dan en el texto.

El autor ha tenido la debida diligencia y cuidado en preparar el texto, pero no asume ninguna responsabilidad legal por la información y precisiones aquí incluidas o por las posibles consecuencias de su utilización. Sin embargo, el autor apreciaría sinceramente que se le avisase por parte de los lectores de cualesquiera errores u omisiones de modo que se puedan efectuar los cambios necesarios en el texto o ilustraciones.

A. L. Kohan

---

* *N. del T.:* O más sencillamente, con fines didácticos para el lector en general, dado su alto contenido técnico y complemento a la doctrina que se expone en los capítulos del libro. No olvidemos el dicho de Newton: «In scientiis addiscendis prosunt exempla magis quam praecepta» (en materia docente científica aprovechad más los ejemplos que los preceptos).

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

A o *a*	área
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
ASTM	Sociedad Americana para Ensayos y Materiales
AWS	Sociedad Americana de Soldadura
Bhn	número de dureza Brinell
BTU	unidad térmica británica
C	carbono
C	culombio
C	constante
Ca	calcio
°C	grados Celsius (centígrados)
cm	centímetro
cm^3	centímetro cúbico
CO	monóxido de carbono
CO_2	dióxido de carbono
Código, el.	código ASME de Calderas y Recipiente a Presión
Cu	cobre
D	diámetro de una virola o calderín
E	módulo de elasticidad de Young = tensión unitaria dividida por resistencia unitaria (29×10^6 para el acero)
°F	grados Fahrenheit
Fe	hierro
FS	factor de seguridad
ft	pie
gal	galón
gr/gal	granos por galón o gramos/litro
g/min	galones por minuto (caudal)
H	hidrógeno
H_2O	agua
HAZ	zona afectada por el calor
HTHN	sistema de agua caliente de alta temperatura
HP	caballo de potencia
hr	hora
HRT	caldera tubular de retorno horizontal

HS	superficie de calefacción (de agua)
ID	diámetro interior
in	pulgada
J	julio
k	constante
kg	kilogramo
kW	kilowatio
l	litro
l o L	longitud
Lb	libra
máx	máximo
Mg	magnesio
$MgSO_4$	sulfato magnésico
mm	milímetro
Mn	manganeso
NB	Asociación Nacional de Inspectores de Calderas y Recipientes a Presión
N	nitrógeno
NaOH	hidróxido sódico
$NaSiO_2$	silicato sódico
NDE	examen no destructivo
NDT	pruebas no destructivas
Ni	níquel
O	oxígeno
OD	diámetro exterior
OH	oxhídrilo (o hidróxido)
OZ	onza
p	paso en mm, normalmente de una serie de orificios
P	máxima presión admisible de trabajo
Si	silicio
SM	caldera escocesa marina
SiO_2	sílice
SMAW	soldadura metálica de arco protegido
SO_4	sulfato
std	estándar, normal, normalizado
t	espesor en mm, a no ser que se diga otra medida
temp	temperatura
TS	resistencia a la tracción
V	vanadio
VT	caldera vertical tubular
W	watio
yd	yarda
YP	punto de rotura
%	porcentaje
μm	micromilésima (micra)

Capítulo 1

SISTEMAS DE CALDERAS. CLASIFICACIONES Y PRÁCTICAS DE OPERACIÓN FUNDAMENTALES

OPERACIÓN ACTUAL Y RESPONSABILIDADES

La operación de una planta de calderas, su mantenimiento e inspección requieren el servicio de personal técnico preparado a causa del desarrollo y mejora tecnológica en los materiales. Esto es debido también al avance en todo lo relativo a principios metalúrgicos sobre rotura de materiales, soldadura de componentes de una caldera y en reparaciones, así como al desarrollo de sensores que permitan un control más automático, y finalmente debido también a la aplicación de la informática y de los ordenadores en las operaciones y condiciones de marcha de todas las calderas.

Las calderas se utilizan a muy diferentes presiones y temperaturas, con grandes variaciones de carga y distintos sistemas de combustión. Los diseñadores y fabricantes aplican los principios de transferencia térmica al diseño de sistemas de calderas, pero deben también tener amplia formación técnica en mecánica de fluidos, metalurgia, resistencia de materiales, quemadores, controles y dispositivos de seguridad para el sistema de calderas, y todo ello según las estipulaciones y requerimientos normativos y de Códigos oficiales aprobados.

La preparación y conocimiento requerido por los operarios de calderas puede variar a causa de la amplitud y rango de las instalaciones, desde los sistemas más simples de calefacción, a los procesos y sistemas integrados de las instalaciones de calderas. Los controles de trabajo podrán variar desde el manual al semiautomático o al totalmente automático. La tendencia es a la marcha automática. Sin embargo, los operarios expertos siempre estudian la disposición de la planta de calderas de modo que los componentes, servicios auxiliares, controles, tuberías y posibles procedimientos de emergencia puedan comprenderse y seguirse completamente. El estudio deberá incluir una revisión de los bucles o circuitos de combustibles líquidos, gaseosos o sólidos, aire, agua y vapor y las limitaciones asignadas que cada uno pueda tener en su operación.

Los operarios y técnicos deben familiarizarse con los controles modernos de caldera que están basados en un sistema integrado que implica controlar:

1. Flujo de carga para el calor, usos en proceso o generación de energía eléctrica.
2. Flujo o caudal de combustible y su eficiencia de combustión.
3. Flujo o caudal de aire para mantener una combustión eficiente y adecuada.
4. Flujos o caudales de agua y vapor para mantener la carga.
5. Flujo del escape de los productos de la combustión.

Las plantas automatizadas al máximo requieren el conocimiento de cómo trabaja el sistema para producir los resultados deseados y cómo hacerlo para cumplir los objetivos según el diseño. Puede necesitarse el manual de operación en condiciones de emergencia, que es cuando el conocimiento de los diferentes «bucles» de un sistema de calderas puede ayudar al operario a restablecer las condiciones de normalidad con mucha mayor rapidez. Con la llegada de los ordenadores, si un sistema de calderas está fuera de límites, el personal capacitado puede restablecerlo a través del sistema y ver si el problema está en los instrumentos o en los actuadores fuera de punto, o si un componente del sistema ha tenido una rotura o un fallo eléctrico o mecánico.

Responsabilidades fundamentales de la operación. Los operarios deben estar familiarizados con ciertos principios fundamentales que fueron propuestos en el pasado, especialmente en los sistemas operados manualmente. Entre éstos estaban las siguientes reglas:

1. Mantenimiento y comprobación del nivel de agua, al menos una vez por turno.
2. Bajo nivel y acciones requeridas por el operario para minimizar los daños que la falta de agua puede causar.
3. Corte por bajo nivel de agua, probándolo para estar seguro de si funciona, normalmente una vez por turno. Esto incluye purga de la cámara del flotador o alojamiento del sensor, de modo que no pueda estar obstruido por depósitos internos.
4. Los grifos de prueba deben mantenerse limpios y secos. Deberían probarse una vez por turno para asegurarse de que todas las conexiones al nivel de vidrio y columnas de agua están expeditas y limpias, y así por prueba de los grifos puede determinarse el nivel real a través del vidrio.
5. Las válvulas de seguridad deberían probarse al menos una vez al mes, levantando la palanca y desplazando el asiento de la válvula suavemente. Si la válvula no despega, es un indicativo de que el óxido o materias del agua de la caldera están obstruyendo la válvula y se necesitan correcciones o reparación. La caldera debería ponerse en seguridad y no funcionar hasta que no se elimine el defecto de la válvula de seguridad.
6. Los quemadores deberían mantenerse limpios y libres de pérdidas y con la llama ajustada de modo que no toque las paredes laterales, chapas y tubos. La seguridad de llama (por célula) debería ser comprobada cada turno

para estar seguro de que están en correcto orden de funcionamiento y así prevenir y evitar explosiones en el hogar.

7. Las partes internas de la caldera deben mantenerse libres de deposiciones, lodos o aceite mediante un tratamiento adecuado del agua y procedimientos de purga para evitar recalentamientos, bolsas y depósitos en chapas, tubos y válvulas, y evitar asimismo una rotura o explosión importantes.
8. El exterior de la caldera debería mantenerse limpio y seco. No se debe permitir la acumulación de productos de soplado o de inquemados, ya que éstos pueden llevar a acumulaciones y a un mal funcionamiento de controles y actuadores, así como a producir corrosión en diferentes partes o zonas de la caldera.
9. Las fugas o pérdidas son un signo de peligro en el sistema de la caldera y deberían ser reparadas inmediatamente por el posible peligro que implican y también porque aceleran la corrosión y desgaste de los componentes del sistema, que pueden producir cortes y paradas forzosas.
10. Cuando ponga una caldera fuera de servicio, no acelere el proceso purgando la caldera con presión para evitar el cocimiento de los lodos y depósitos por el calor y sobre las superficies internas. Deje que la caldera se enfríe lentamente; después drene y limpie las partes superior e inferior de las superficies interiores.
11. Las compuertas deberán mantenerse en buenas condiciones para evitar que el combustible no consumido se acumule en las cámaras de combustión del hogar y produzcan explosiones del lado de fuego*. Todas las conexiones y pertenencias de caldera deberán mantenerse en buen estado de trabajo para conseguir una marcha y funcionamiento eficientes y también prevenir y evitar paradas forzosas.
12. Las calderas aisladas y fuera de servicio por un largo período, especialmente las calderas de acero, deberán tener sus aberturas de hombre y las de servicio manual sin las tapas, abiertas, seguido todo ello de una limpieza interior de las superficies para remocionar depósitos y otros contaminantes. La caldera deberá mantenerse seca. (Los últimos capítulos describirán los métodos utilizados para mantener una caldera seca.) Las calderas de fundición se limpian normalmente del lado de fuego y se mantienen húmedas (con agua).
13. La purga debería hacerse después de todo encendido o puesta en marcha para limpiar los pasos del hogar de todo combustible inquemado y así evitar explosiones del lado de hogar.
14. La preparación de una caldera para inspección por consideraciones legales precisa que todas las superficies o zonas interiores críticas estén disponibles para la inspección (descrita en capítulos posteriores). Esto requiere que las tapas de las aberturas de hombres y de mano están expeditas, con la caldera enfriada lentamente, y todas las superficies interiores y exteriores limpias, incluyendo las zonas de fuego (hogar y conducto de gases) de la caldera y sus componentes. Todas las válvulas deberán estar cerradas para evitar que el vapor o agua entren en la caldera así aislada.

---

* *N. del T.:* Los circuitos de una caldera se clasifican en dos apartados fundamentales: los del lado de fuego y gases y los del lado de agua.

15. Mantener la prueba del tratamiento de agua de caldera y su aplicación según las directrices establecidas por los especialistas del tratamiento de agua. Esto ayudará a evitar el crecimiento de depósitos y gases disueltos en el agua de caldera eliminando la formación de ácidos que pueden provocar corrosión en el sistema de caldera y ayudar también a mantener el rendimiento de ésta.
16. Mantener la purga adecuada para remoción de lodos que se puedan desarrollar en el agua de caldera. Siga las recomendaciones del especialista en tratamiento de agua sobre la frecuencia y número de purgas.

Estas responsabilidades fundamentales son importantes para mantener una planta de calderas segura y eficiente y se consideran como las mínimas responsabilidades del operario de calderas. Los capítulos posteriores tratarán de otras características de funcionamiento, mantenimiento, inspección y reparación de calderas.

Nuevas instalaciones de calderas, reparaciones y remodelaciones. Los operarios expertos en plantas de alta presión están también implicados en poner en servicio una nueva caldera, asegurando que se siguen los procedimientos adecuados de operación durante las comprobaciones y chequeo preliminares y finales del grupo de combustión, bombas, ventiladores, válvulas, controles, dispositivos de seguridad y todos los componentes que pueda comprender el sistema de calderas. Otras actividades en calderas nuevas corresponden a la limpieza de superficies internas y de calentamiento y purga de las líneas de vapor antes de la aceptación final de las pruebas de puesta en marcha. También se incluye en el procedimiento de aceptación la prueba hidrostática, calibración de instrumentos y controles, prueba de la válvula de seguridad, puesta en marcha, arranque, prueba y seguridad de que todo el equipo auxiliar de caldera funciona según diseño. Las garantías de rendimiento y capacidades deben ser verificadas según los rendimientos estipulados.

Experiencia actualizada. Los operarios y técnicos de las plantas semiautomáticas y automáticas deben continuar estudiando los sistemas bajo su control, porque a causa del progreso en los controles y aplicaciones de ordenador, los sistemas están más automatizados cada día. La optimización del rendimiento del equipo se considera ahora como un objetivo deseable en la operación del sistema. Esto incluye aumentar el rendimiento de la operación, ganancias en el cumplimiento medioambiental y ganancias económicas provenientes de una mejor operación y marcha. La aplicación del ordenador a los sistemas energéticos necesita menos personal para operar un sistema de calderas, pero también requiere más conocimiento por el operario. Por ejemplo, en un sistema de planta de calderas totalmente integrado, el operario está en una sala de control y está conectado a la caldera, y quizás a los equipos de generación, por medio de pantallas de vídeo que muestran los diferentes datos al operador pulsando las teclas correspondientes del ordenador. Éste puede mostrar al operario el estado de cada unidad por lo que respecta a carga, presión y temperatura como se muestra en la Figura 1.1. El ordenador puede programarse para que cada subproceso tenga sus características de arranque y parada secuencial. Puede incorporarse o introducirse lógica inteligente que puede interrumpir una secuencia de

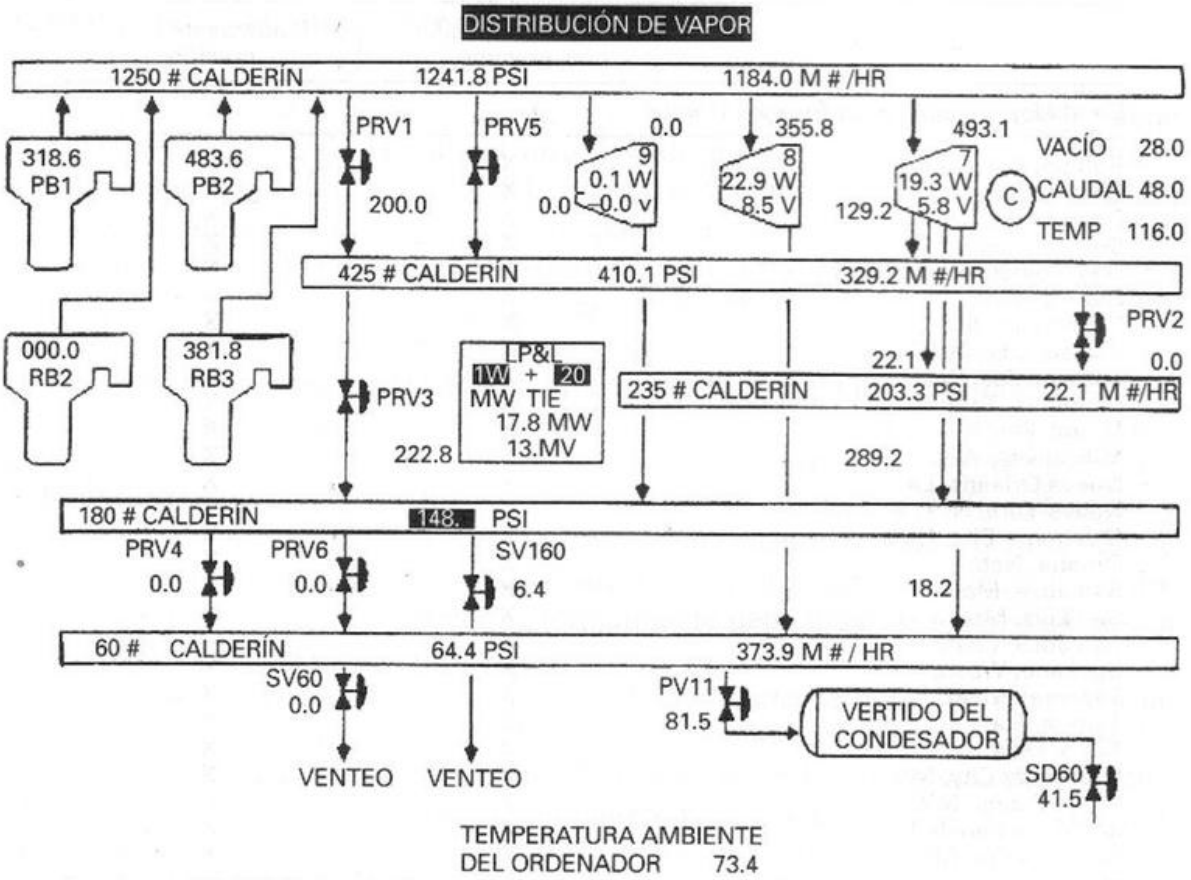


Figura 1.1. Impreso de ordenador (pantalla) de flujo de vapor, presión y carga del turbogenerador incluyendo conexión de energía exterior para planta de energía de una papelera.

arranque si las condiciones no están dentro de los límites de ajuste. Es importante para los operarios y técnicos estar alerta y al corriente de los desarrollos en la rápida expansión de la tecnología de los ordenadores en línea.

Legislación y licencias legales de funcionamiento

A causa del peligro inherente de explosiones e incendio que existe en un sistema de caldera, muchas jurisdicciones exigen que los operarios del sistema de calderas pasen un examen escrito u oral supuesto que el candidato también tiene ya una experiencia apropiada bajo la supervisión de otro operario con carnet*. La Figura 1.2 de la página siguiente da un listado de las jurisdicciones estadounidenses que tienen leyes de licencia para operadores de calderas. Los departamentos jurisdiccionales y direcciones para las autorizaciones y concesión de licencia están listados en la publicación de McGraw-Hill, *Manual de Servicios y Operaciones de Planta* (1995).

---

* *N. del T.:* En España se expiden por las correspondientes Delegaciones de Industria, previos cursos y examen los «carnets» o títulos de Instalador-Mantenedor y Reparador de Instalaciones de Agua Caliente y Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado.

Jurisdicción	Calderas de alta presión	Calderas de baja presión
Condados y ciudades de Estados Unidos		
Buffalo, N.Y.	X	—
Chicago, Ill.	X	—
Dearborn, Mich.	X	X
Denver, Colo.	X	X
Des Moines, Iowa	X	X
Detroit, Mich.	X	X
F. San Luis, Ill.	X	X
Kansas City, Mo.	X	X
Los Angeles, Calif.	X	X
Memphis, Tenn.	X	X
Miami, Fla.	X	X
Milwaukee, Wis.	X	X
Nueva Orleans, La.	X	X
Nueva York, N. Y.	X	—
Oklahoma City, Okla.	X	X
Omaha, Neb.	X	X
San José, Mo.	X	X
San Luis, Mo.	X	X
San José, Calif.	X	—
Spokane, Wash.	X	X
Tacoma, Wash.	X	X
Tampa, Fla.	X	X
Tulsa, Okla.	X	X
University City, Mo.	X	X
White Plains, N.Y.	X	—
Jefferson Parish, La.	X	X
St. Louis Co., Mo.	X	X
Estados		
Alaska	X	X
Arkansas	X	X
Columbia	X	X
Massachusetts	X	—
Minnesota	X	X
Montana	X	X
Nebraska	—	X
New Jersey	X	X
Ohio	X	X
Pennsylvania	X	X
Provincias de Canadá		
Alberta	X	X
Columbia británica	X	X
Manitoba	X	X
New Brunswick	X	X
Newfoundland and Labrador	X	X
N.W. Territory	X	X
Nova Scotia	X	—
Ontario	X	X
Quebec	X	X
Sasktchewan	X	X
Yukon	X	X

Nota: Debido a variaciones en las leyes, es necesario comprobar la jurisdicción para los requisitos específicos sobre operadores con licencias.

Figura 1.2. Jurisdicciones que tienen leyes operativas de licencias de ingeniería para calderas.

Transferencia térmica y funcionamiento

Un estudio de termodinámica, ciclos de vapor y transferencia básica de calor puede ayudar a la operación de la caldera instituyendo un programa de trazado térmico para aumentar la eficiencia y señalar las pérdidas térmicas en el funcionamiento de la planta de calderas. Una caldera es un aparato de transferencia térmica que convierte combustible fósil, energía eléctrica o nuclear, a través de un medio de trabajo como agua, o fluidos orgánicos tales como el Dowtherm, y así dirige esta energía hacía algún aparato externo de transferencia de calor, como los utilizados para calefacción de edificios o de utilización en proceso. Esta energía puede también convertirse para producir energía mecánica (con motores de accionamiento mecánico) mediante turbinas de vapor o con turbo-generadores para producir energía eléctrica.

El flujo térmico en una caldera puede aceptar la eficiencia de la operación y puede producir problemas de recalentamiento, como cuando se deja o permite que se acumulen capas de incrustación en los tubos. El flujo de calor puede tener lugar por conducción, convección o radiación y normalmente tiene lugar de los tres modos en el interior de la caldera.

Conducción es la transferencia de calor de una parte del material a otra o a un material con el que está en contacto. El calor se entiende como una actividad molecular o, hablando más claramente, como la vibración de las moléculas de un material. Cuando se calienta una parte de un material, la vibración molecular aumenta. Esto excita el incremento de la actividad en las moléculas adyacentes, y el flujo térmico se establece desde la parte caliente del material a las partes más frías. En las calderas tiene lugar una considerable conductividad superficial entre un fluido y un sólido, por ejemplo entre el agua y un tubo o entre el gas y un tubo, además de la conductividad a través del metal de un tubo, chapa u hogar.

Mientras la conductancia superficial juega una parte vital en el rendimiento de la caldera, también puede conducir a fallos o roturas metálicas cuando las superficies de calefacción se recalientan, como puede ocurrir cuando las superficies están aisladas por las incrustaciones. La conductancia o conductividad superficial, cuando se expresa en BTU (o kcal) por pie cuadrado (o m^2) de superficie calefactora para una diferencia de 1 °F (o 1 °C) de temperatura del fluido y de la superficie adyacente, se conoce como coeficiente superficial o coeficiente pelicular. La Figura 1.3*a* de la página siguiente muestra unas zonas de remanso cercanas al tubo donde el coeficiente pelicular reduce la transferencia térmica.

El coeficiente de conductividad térmica se define como la cantidad de calor que fluirá a través de esta área unitaria en la unidad de tiempo si el gradiente de temperatura a través de esta área es la unidad. En física, las unidades se expresan como BTU por hora por pie cuadrado y grado Fahrenheit por pie (kcal por hr y metro cuadrado y grado centígrado por metro). Expresada matemáticamente, la tasa de transferencia de calor por conducción a través de un área A y para un gradiente de grados centígrados por metro T/L, es:

$$O = kA\frac{T}{L}$$

donde: k = coeficiente de conductividad térmica.

Nótese que k varía con la temperatura. Por ejemplo, el acero dulce a 32 °F (0 °C) tiene una conductividad térmica de 36 BTU/hora/pie cuadrado/°F/pie, mientras que a 212 °F (100 °C) es de 33.

La *convección* es la transferencia de calor a o desde un fluido (líquido o gas) fluyendo hacia o sobre la superficie de un cuerpo. Con mayor precisión, se define como libre o forzada. La convección libre es la que produce circulación del fluido de transferencia debido a una diferencia de densidad resultante de los cambios de temperatura.

Por ejemplo, en la Figura 1.3*b* el agua calentada y el vapor ascienden desde la izquierda y son desplazados por el agua más fría (y más pesada) de la derecha. Esto produce convección libre de calor (transferencia de calor) entre el calor de un lado del tubo en U y el agua fría del otro lado. Ahora, la conducción tiene lugar primero entre la película gaseosa y el metal del tubo, después al agua. Pero si el agua no circula, dará por resultado una igualación de las temperaturas. La transferencia de

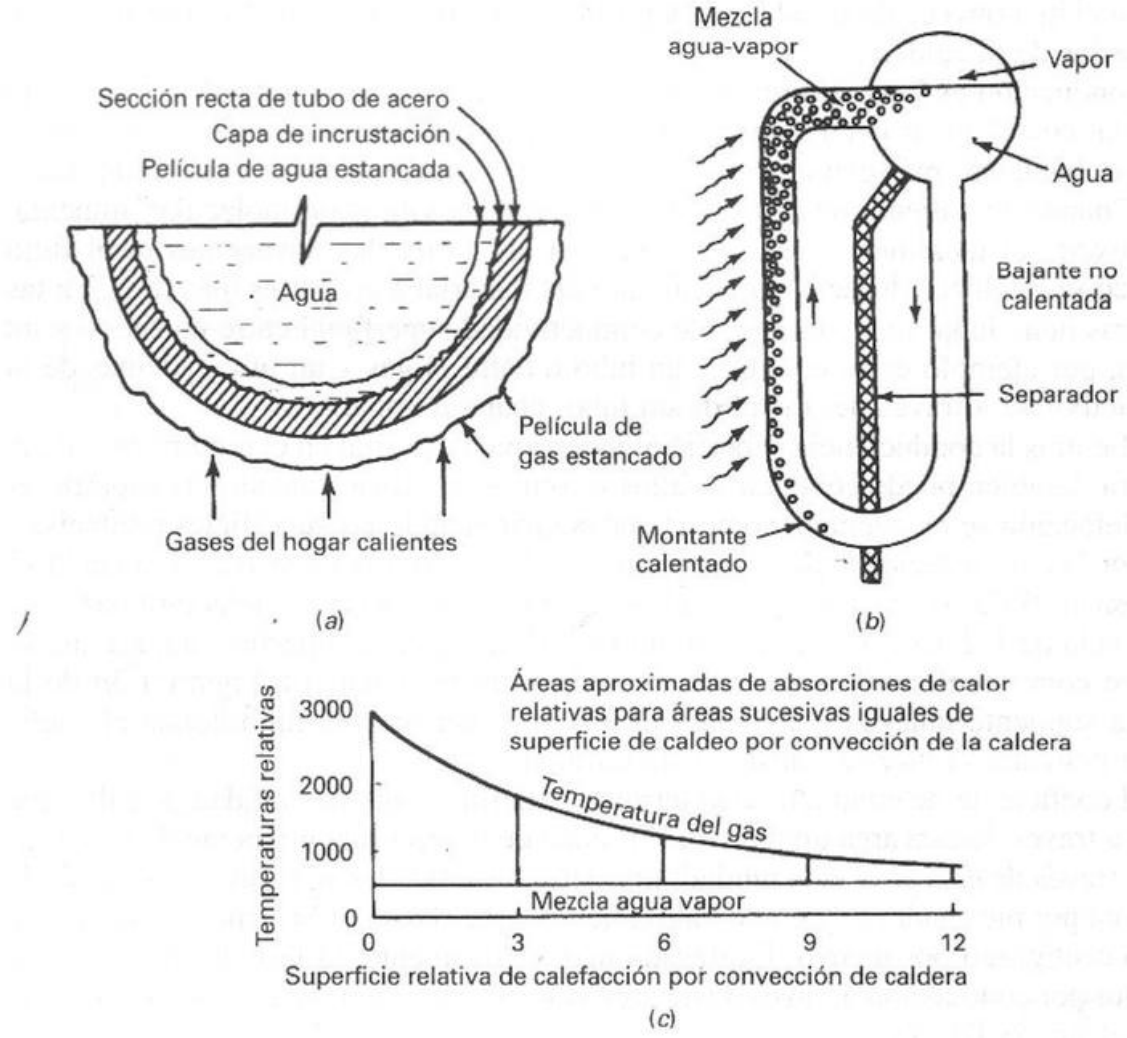


Figura 1.3. Factores que afectan a la transferencia térmica en componentes de calderas. (*a*) El agua y el gas estancados e incrustados cerca del tubo afectan al calor transferido a través del tubo. (*b*) La circulación depende del agua caliente que sube, mientras el agua más fría desciende para reemplazarla. (*c*) La adición de superficie calefactora incrementa la absorción de calor pero a una tasa reducida.

calor entonces cesaría. La convección forzada tiene lugar cuando la circulación del fluido es positiva por algún medio mecánico significativo, como una bomba de agua o un ventilador para los gases. La transferencia de calor por convección está pues ayudada mecánicamente, en el caso de la convección forzada.

Añadiendo superficie de caldera puede aumentar la absorción de calor, pero como se ve en la Figura 1.3*c*, el gradiente de temperatura caerá más y más. Así pues en algún punto la ganancia en eficiencia será mucho menor que la requerida por la circulación forzada y se incrementará con la adición de superficie calefactora por convección.

El circuito hidráulico de una caldera consta de vías de flujo de agua creado por la diferencia entre las alturas o columnas de agua y de mezcla agua-vapor. El flujo en los tubos y montantes está inducido por la diferencia en la densidad del agua y en las mezclas agua-vapor. El agua más pesada fluirá a la parte inferior mientras que la mezcla agua-vapor asciende en la caldera por las vías agua-vapor. A mayor presión del vapor, mayor densidad adquiere, lo que da como resultado una pérdida de flujo a medida que el vapor se aproxima en densidad a la del agua. Ésta es la razón por la que se usan las bombas para promover la circulación en calderas de muy alta presión. El flujo insuficiente crea ineficiencia en la utilización de las superficies de calefacción, pero puede también dar como resultado el recalentamiento de los tubos debido a la falta de circulación de agua.

Nótese que en la Figura 1.4*a* de la página siguiente se requiere más superficie de tubo a baja presión que a presión elevada para que exista la misma circulación. Pero la fuerza que produce la circulación es menor a alta que a baja presión. Esto implica el cambio en el peso específico del agua y vapor a medida que aumenta la presión. La mezcla realmente pesa menos en libras por pie cúbico (kg por metro cuadrado) a presiones elevadas. Por ejemplo, en la Figura 1.4*b*, a la presión crítica de 3206,2 psia (224,4 kg/cm^2), el agua y el vapor tienen el mismo peso específico. Las pérdidas por rozamiento debido al flujo son generalmente menores a presión elevada. Esto es debido fundamentalmente al flujo más laminar, o en líneas de corriente, y a la menor turbulencia del flujo en los tubos.

Cuando la ebullición tiene lugar en un tubo, se forman burbujas de vapor y se liberan de la superficie en contacto con el líquido. Esta acción burbujeante crea vacíos (Fig. 1.4*c*) de tipo renovado a causa de la rapidez de la acción. Esto a su vez crea turbulencia cerca de las superficies de transferencia de calor, lo que generalmente aumenta la tasa de transferencia térmica. Pero la pérdida de humedad a medida que se forman las burbujas puede disminuir la transferencia de calor. La presión tiene un gran efecto sobre la ebullición y la tasa de transferencia térmica. Con altas presiones (Fig. 1.4*d*) las burbujas tienden a dar vía de salida a lo que se llama coeficiente pelicular con el que la película de vapor cubre la superficie a calentar. Este fenómeno es muy crítico en el funcionamiento de la caldera, produciendo a menudo fallos y roturas en los tubos de agua debido al estancamiento, incluso aunque el nivel de vidrio señale el nivel correcto. Además está implicada la formación de incrustaciones e impurezas a lo largo de la superficie de ebullición de un tubo.

La radiación es una forma continua de intercambio de energía por medio de ondas electromagnéticas sin cambio en la temperatura del medio interpuesto entre los dos cuerpos.

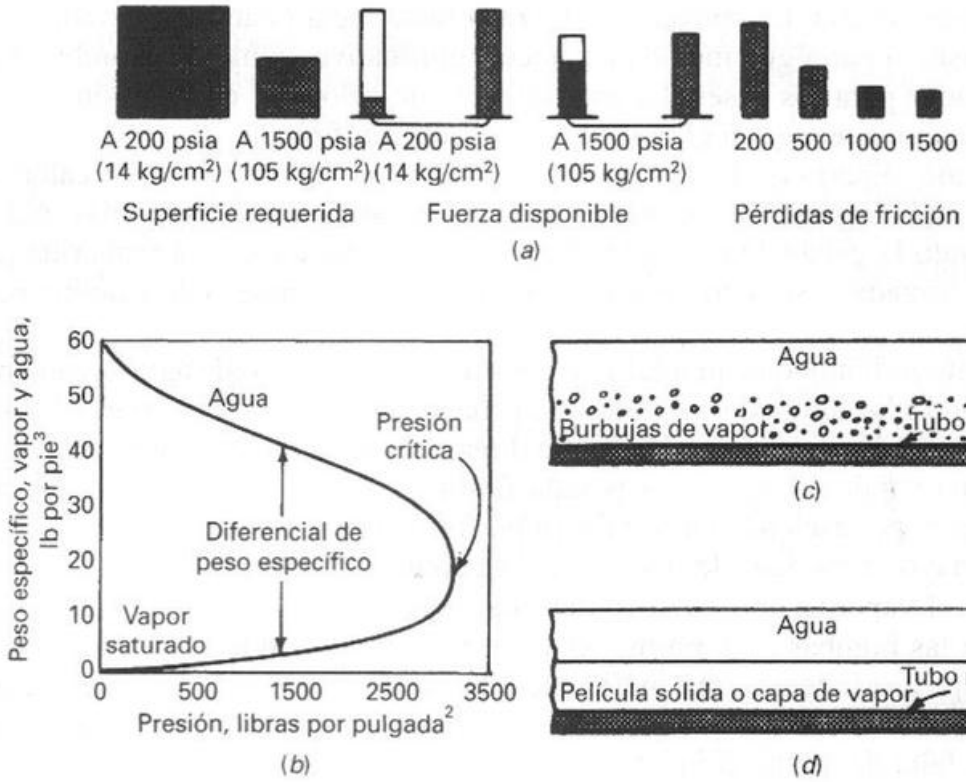


Figura 1.4. Efecto de la presión sobre la tasa de circulación. (*a*) El área del tubo necesitada es mayor a baja presión; la fuerza para producir la circulación es menor a alta presión; la pérdida de fricción es mayor a baja presión. (*b*) A la presión crítica, el vapor y el agua tienen el mismo peso específico. (*c*) A baja presión las burbujas de vapor se forman cerca del tubo metálico. (*d*) A alta presión, una película sólida o capa de vapor se forma en la superficie metálica del tubo.

La *radiación* está presente en todas las calderas. De hecho, todas las calderas utilizan los tres modos de transferencia térmica: *conducción*, *convección* y *radiación.*

Propiedades del vapor y sistemas de caldera

Una breve revisión de algunas propiedades del vapor ayudarán también a diferenciar los distintos sistemas de calderas. Una tabla de constantes del vapor es necesaria para calcular la eficiencia de la caldera. La norma en Estados Unidos es el libro «Propiedades Termodinámicas del Vapor», de Keenan y Keyes, publicado por la editorial John Wiley & Sons Inc., de Nueva York. Para los datos basados en la temperatura utilice la tabla 1 de la Figura 1.5. Use la tabla 2 si usted conoce la presión. Todas las presiones de estas tablas son absolutas. Para obtener la presión absoluta, añada 1 kg/cm^2 a la presión manométrica (o bien 14,7 psi a la presión en unidades americanas).

Para las propiedades del vapor recalentado, use la tabla 3 de la Figura 1.5. Esta tabla de vapor sobrecalentado debe utilizarse con la presión absoluta (manométrica más 15 psi) y con la temperatura total del vapor, no los grados de recalentamiento.

Tabla 1. Temperaturas de saturación

Temp. F	Pres. abs. psi (lb/pulg²)	Vol. específico		Entalpía (calor total)		
		Líq. saturado	Vapor saturado	Calor saturado	Calor de evap.	Vapor saturado
32	0,08859	0,01602	3304,7	0,01	1075,5	1075,5
40	0,12170	0,01602	2444	8,05	1071,3	1079,3
50	0,17811	0,01603	1703,2	18,07	1065,6	1083,7
60	0,2563	0,01604	1206,7	28,06	1059,9	1088,0
70	0,3631	0,01606	867,9	38,04	1054,3	1092,3
80	0,5069	0,01608	633,1	43,02	1048,6	1096,6
90	0,6982	0,01610	468,0	57,99	1042,9	1100,9
100	0,9492	0,01613	350,4	67,97	1037,2	1105,2
110	1,2748	0,01617	265,4	77,94	1031,6	110,5
120	1,6924	0,01620	203,27	87,92	1025,8	1113,7
130	2,225	0,01625	157,34	97,90	1020,0	117,9
140	2,8886	0,01629	123,01	107,9	1014,1	1122,0
150	3,718	0,01634	97,07	117,9	1008,2	1126,1
160	4,741	0,01639	77,29	127,9	1002,3	1130,2
170	5,992	0,01645	62,06	137,9	996,3	1134,2
180	7,510	0,01651	50,23	147,9	990,2	1138,1
190	9,339	0,01657	40,96	157,9	984,1	1142,0
200	11,526	0,01663	33,64	168,0	977,9	1145,9
212	14,696	0,01672	26,80	180,0	970,4	1150,4
220	17,186	0,01677	23,15	188,1	965,2	1158,4
240	24,969	0,01692	16,323	208,3	952,2	1160,5
280	49,203	0,01726	8,645	249,1	924,7	1173,8
300	67,013	0,01745	6,466	269,6	910,1	1179,7
340	118,01	0,01787	3,788	311,1	879,0	1190,1
380	195,77	0,01836	2,335	353,5	844,6	1198,1
400	247,31	0,01864	1,8633	375,0	826,0	1201,0

Tabla 2. Vapor sobrecalentado

Pres. abs. psi (lb/pulg²)	Temp. F	Vol. específico		Entalpía (calor total)		
		Líq. saturado	Vapor saturado	Calor saturado	Calor de evap.	Vapor saturado
0,50	79,58	0,01608	641,4	47,6	1048,8	1096,4
1,0	101,74	0,01614	333,6	69,7	1036,3	1106,0
5,0	162,24	0,01640	73,52	130,1	1001,0	1131,1
10	193,21	0,01659	38,42	161,2	982,1	1143,3
14,7	212,00	0,01672	26,80	180,0	970,4	1150,4
15	213,03	0,01672	26,29	181,1	969,7	1150,8
20	227,96	0,01683	20,089	196,2	960,1	1156,3
25	240,07	0,01692	16,303	208,5	952,1	1160,6
30	250,33	0,01701	13,746	218,8	945,3	1164,1
40	267,25	0,01715	10,498	236,0	933,7	1169,7
50	281,01	0,01727	8,515	250,1	924,0	1174,1
60	292,71	0,01738	7,175	262,1	915,5	1177,6
70	302,92	0,01748	6,206	272,6	907,9	1180,6
80	312,03	0,01757	5,472	282,0	901,1	1183,1
90	320,27	0,01766	4,896	290,6	894,7	1185,3
100	27,81	0,01774	4,432	298,4	888,8	1187,2
110	334,77	0,01782	4,049	305,7	883,2	1188,9
120	341,25	0,01789	3,728	312,4	877,9	1198,4
130	347,32	0,01796	3,455	318,8	872,9	1191,7
140	353,02	0,01802	3,220	324,8	868,2	1193,0
150	358,42	0,01809	3,015	330,5	863,6	1194,1
200	381,79	0,01839	2,288	355,4	843,0	1198,4
250	400,95	0,01865	1,8438	376,0	825,1	1201,1
300	417,33	0,01890	1,5433	393,8	809,0	1202,8
350	431,72	0,01913	1,3260	409,7	794,2	1203,9
400	444,59	0,0193	1,613	424,0	780,5	1204,5

Tabla 3. Vapor sobrecalentado

Presión absoluta (lb/pulg²)	*	Líquido saturado	Vapor saturado	Temperatura, °F							
				300	400	500	600	700	800	900	1.000
15	v	0,016	26,29	29,91	33,97	37,99	41,99	45,98	49,97	53,95	57,93
(213,03)	h	181,1	1150,8	1192,8	1239,9	1287,1	1334,8	1383,1	1432,3	1482,3	1533,1
20	v	0,016	20,09	22,36	25,43	28,46	31,47	34,47	37,46	40,45	43,44
(227,96)	h	196,2	1156,3	1191,6	1239,2	1286,6	1334,4	1382,9	1432,1	1482,1	1533,0
40	v	0,017	10,498	11,040	12,628	14,168	15,688	17,198	18,702	20,20	21,70
(267,25)	h	236,0	1169,7	1186,8	1236,5	1284,8	1333,1	1381,9	1431,3	1481,4	1532,4
60	v	0,017	7,175	7,259	8,357	9,403	10,427	11,441	12,449	13,452	14,454
(292,71)	h	262,1	1177,6	1181,6	1233,6	1283,0	1331,8	1380,9	1430,5	1480,8	1531,9
80	v	0,018	5,472	...	6,220	7,020	7,797	8,562	9,322	10,077	10,830
(312,03)	h		282,10	1183,1	1230,7	1281,1	1330,5	1379,9	1429,7	1480,1	1531,3
100	v	0,018	4,432		4,937	5,589	6,218	6,835	7,446	8,052	8,656
(327,81)	h	298,4	1187,2		1227,6	1279,1	1329,1	1378,9	1428,9	1479,5	1530,8
150	v	0,018	3,015		3,223	3,681	4,113	4,532	4,994	5,352	5,758
(358,42)	h	330,5	1194,1		1219,4	1274,1	1325,7	1376,3	1426,9	1477,8	1529,4
200	v	0,018	2,288		2,361	2,726	3,060	3,380	3,693	4,002	4,309
(381,79)	h	355,4	1198,4		1210,3	1268,9	1322,1	1373,6	1424,8	1476,2	1528,0
300	v	0,0189	1,5433			1,7675	2,005	2,227	2,442	2,652	2,859
(417,33)	h	393,8	1202,8			1257,6	1314,7	1368,3	1420,6	1472,8	1525,2
400	v	0,0193	1,1613			1,2851	1,4770	1,6508	1,8161	1,9767	2,134
(444,59)	h	424,0	1204,5			1245,1	1306,9	1362,7	1416,4	1469,4	1522,4
500	v	0,0197	0,9278			0,9927	1,1591	1,3044	1,4405	1,5715	1,6996
(467,01)	h	449,4	1204,4			1231,3	1298,6	1357,0	1412,1	1466,0	1519,6
600	v	,0201	0,7698			0,7947	0,9463	1,0732	1,1899	1,3013	1,4096
(486,21)	h	471,6	1203,2			1215,7	1289,9	1351,1	1407,7	1462,5	1516,7
800	v	0,0209	0,5687				0,6779	0,7833	0,8763	0,9633	1,0470
(518,23)	h	509,7	1198,6				1270,7	1338,6	1398,6	1455,4	1Z511,0
1000	v	0,0216	0,4456				0,5140	0,6084	0,6878	0,7604	0,8294
(544,61)	h	542,4	1191,8				1248,8	1325,3	1389,2	1448,2	1505,1
1200	v	0,0223	0,3619				0,4016	0,4909	0,5617	0,6250	0,6843
(567,22)	h	571,7	1183,4				1223,5	1311,0	1379,3	1440,7	1499,2
1400	v	0,0231	0,3012				0,3174	0,4062	0,4714	0,5281	0,5805
(587,10)	h	598,7	1173,4				1193,0	1295,5	1369,1	1433,1	1493,2

Figura 1.5. Relaciones de presión y temperatura del agua y vapor. Usar la Tabla 1, para los datos basados en la temperatura, la Tabla 2, para los datos basados en la presión, y la Tabla 3, para los datos basados en el vapor sobrecalentado.

Esta temperatura total es la temperatura de saturación (también dada en las tablas) más los grados de sobrecalentamiento*.

Entalpía significa el contenido calorífico del fluido. En relación con el agua y el vapor, hay tener en cuenta tres entalpías:

1. La entalpía del líquido saturado (en BTU/libra o kcal/kg) es el contenido calorífico del agua a una presión y temperatura determinadas.
2. La entalpía de evaporación (BTU/libras o kcal/kg) es el calor requerido para evaporar 1 libra de agua (1 kg) pasando a vapor a esa presión y temperatura.
3. La entalpía del vapor saturado (BTU/libra o kcal/kg) es el contenido calorífico del vapor saturado a la presión y la temperatura que están siendo consideradas.

La entalpía del vapor saturado es, por tanto, la suma de la entalpía del líquido saturado y la de evaporación, o contenido total calorífico del vapor saturado en BTU/libras o kcal/kg.

Las Tablas 1 y 2 de la Figura 1.5 dan las propiedades del agua y del vapor saturado. La única diferencia es que en la Tabla 1 entramos con la temperatura de caldera, mientras que en la Tabla 2 entramos con la presión de caldera. Por ejemplo, la Tabla 1 muestra que para que el agua hierva a 100 °F (37,77 °C) La presión absoluta debe ser de 0,45 psi (0,0665 kg/cm^2). La Tabla 2 muestra que a 40 psi (2,8 kg/cm^2), el agua hierve a 267 °F (130,55 °C). No es necesario utilizar todos los dígitos dados en la tabla. La mayoría del trabajo práctico no lo necesita. Los ingenieros raramente necesitan cifrar las temperaturas del agua tan aproximadas hasta la fra más cercana a la fracción de grado, ni los calores o entalpías más aproximadas que a 1 BTU (o kcal).

Líquido saturado significa agua líquida a la temperatura de saturación o ebullición; vapor saturado significa vapor a la temperatura de ebullición. Cuando el agua está hirviendo en un recipiente cerrado, ambos, el agua y el vapor que está sobre ella, están en condiciones de saturación. El vapor está saturado cuando es generado por una caldera sin sobrecalentador. El vapor saturado significa vapor que no contiene agua líquida (o antes del sobrecalentador) (o sea, todavía a la temperatura de ebullición). Nótese que la presión absoluta es presión manométrica más 15 libras/pulgada (1 kg/cm^2). Ahora, en la Tabla 2 trate de leer sobre la línea de 50 psia (35 psig más manométrica o 3,5 kg/cm^2 = 2,5 kg/cm^2 más manométrica). La temperatura de ebullición es 281 °F (138,3 °C). A esta temperatura, una libra de agua (0,45 kg) ocupa 0,071 pies cúbicos (0,002 metros cúbicos) y 1 libra de vapor saturado (0,45 kg) llena 8,51 pies cúbicos (241 litros). El volumen específico está en pies cúbicos por libra de vapor o agua (metros cúbicos/kg), así pues, se necesitan 250 BTU (63 kcal) para calentar una libra de agua (0,4536 kg) desde 0 °C hasta el punto de ebullición, y otras 924 BTU (233 kcal) para evaporarla, haciendo un total de 1174 BTU (652,22 kcal/kg).

---

* *N. del T.:* Normalmente, con efectos térmicos es indiferente hablar de sobrecalentamiento o de recalentamiento del vapor. La diferencia está en la situación o localización donde se produce ese efecto térmico, es decir, en el sobrecalentador o en el recalentador (a este último llega el vapor de la expansión de la turbina de alta, antes de entrar en la etapa de media presión).

Como se ha dicho, la entalpía utilizada, llamada calor en las viejas tablas de vapor se da en BTU/libra (kcal/kg). Las tres últimas columnas de las tablas antiguas fueron denominadas de calor del líquido, calor de vaporización y calor total.

Ejemplo. Una caldera genera vapor saturado a 135 psig (150 psia), 69,45 kg/cm^2 (10,5 kg/cm^2 absolutos). La entalpía o calor del vapor final es de 1194 BTU/libras (300,88 kcalorías/libra; 663,33 kcalorías/kilogramo). La cantidad de calor requerido para producir este vapor en una caldera real dependerá de la temperatura de alimentación. Supongamos que la temperatura del agua de alimentación es de 180 °F (82,22 °C). La tabla 1 de la Figura 1.5 muestra que el calor en el agua es de 148 BTU (37,3 kcalorías/libra; 82,23 kcalorías/kilogramo).

Así pues, el calor suministrado para transformar este agua en vapor es meramente la diferencia, o sea: 1.194 – 148 = 1046 BTU (581,11 kcal/kg).

Es fácil a partir de esta cifra calcular el rendimiento de caldera. La caldera genera diez libras de vapor por libra de carbón quemado y el carbón tiene: 13.000 BTU/libra (7.222 kcal/kg). Así pues, por cada 13.000 BTU puestos como combustible (7.222 kcal) hay una entrega en vapor de: 10 × 1.046 = 10.460 BTU (2.635,92).

El rendimiento de cualquier unidad de energía es su entrega efectiva dividida por la aportación, de modo que aquí es: 10.460/13.000 = 0,805; 80,5 por 100 de rendimiento.

Para la mayoría de las cuestiones, en la tabla 1 de la Figura 1.5 no se necesita conseguir un valor exacto del calor del líquido. Solamente reste 32 de la temperatura del agua en °F. Por ejemplo, la entalpía del agua a 180 °F (82,22 °C) es el calor necesario para elevarla (una libra) desde 32 °F (0 °C) a 180 °F (82,22 °C), o sea la diferencia 148 °F (64,4 °C). Esto se lleva cerca de 148 BTU/libras (82,22 kcalorías/kilogramo). Pero no se trabajará tan exactamente para temperaturas muy elevadas. Tome agua a 300 °F (148,88 °C). La tabla 1 (Fig. 1.5) da 269,7 BTU (67,96 kcalorías) mientras nuestro sistema simple da: 300 – 32 = 268 BTU, bastante aproximado para la mayoría de los casos.

Para utilizar las tablas de vapor, para vapor sobrecalentado, la primera columna de la tabla número 3 (Fig. 1.5) da la presión absoluta y (directamente debajo en el paréntesis) la correspondiente temperatura de saturación o de ebullición. En la siguiente columna, v y h indican el volumen específico (de 1 libra) y su contenido de calor o entalpía (también en libras).

Por ejemplo, a 150 psia (10,5 kg/cm^2 absolutos) el volumen de 1 libra es: 0,018 ft^3 para el agua líquida (0,0011 m^3/kg) y 3.015 ft^3 para el vapor saturado (85,372 m^3). Los correspondientes contenidos de calor de 1 libra (0,4536 kg) son: 83,29 kcal y 300,9 kcal (o sea: 183,62 kcal/kg y 663,4 kcal/kg, respectivamente).

Las columnas de temperatura dan el volumen y el contenido de calor por libra (o por kg) para vapor sobrecalentado a la temperatura indicada. Tome vapor a 150 psi (10,5 kg/cm^2) sobrecalentado a una temperatura total de 600 °F (315,6 °C). Mire en la columna de 600 °F (313,6 °C) opuesta a 150 psi (10,5 kg/cm^2). El volumen es de 4.113 ft^3 (116,46 m^3), frente a 3.015 ft^3 (85,37 m^3) para el vapor saturado a la misma presión. Esto es natural porque el vapor se dilata o expande como gas cuando se sobrecalienta. También, el contenido calorífico es naturalmente mayor:

1325,7 BTU (334,08 kcal) en vez de 1194,1 BTU (300,91 kcal). Todo ello por libra. (En el caso del kg, los valores se duplicarían, aproximadamente: 116,46 m^3/lb <> <> 256,5 m^3/kg; 85,37 m^3/lb <> 188,45 m^3/kg; 334,08 kcal/lb <> 738 kcal/kg.)

Nótese que esta tabla da la temperatura real del vapor sobrecalentado antes que los grados de sobrecalentamiento, que es otra cosa distinta. Si el vapor ha sido sobrecalentado desde la temperatura de saturación de 358 °F (181,1 °C) a 600 °F (315,6 °C), el sobrecalentamiento es de 600 – 358 = 242 °F (116,66 °C).

Estas tablas de sobrecalentamiento se utilizan de modo similar a las de saturación. ¿Cuánto calor supone convertir 1 lb de agua de alimentación a 96,1 °C (205 °F) en vapor sobrecalentado a 150 psia (10,5 kg/cm^2) y 600 °F (315,6 °C)? El calor del vapor es de 1.325,7 (1.326) BTU (= 334,15 kcal/lb <> 736,67 kcal/kg). El calor del agua de alimentación es de: 205 – 32 = 173 BTU/lb (96,1 kcal/kg).

Así pues, el calor requerido para convertir 1 lb de vapor es: 1.326 – 173 = = 1.153 BTU/lb (640,55 kcal/kg).

Para calcular el rendimiento o eficiencia de la caldera, el método es el mismo que para hallar el rendimiento o eficiencia de prácticamente cualquier otra clase de equipo energético; a saber, rendimiento o eficiencia es la energía útil de salida dividida por la entrada de energía. Por ejemplo, si obtenemos los 3/4 de lo que ponemos, la eficiencia es 3/4 ó 75 por 100 ó 0,75. En el caso de una caldera, alimentamos en BTU (o kcal) en forma de carbón, gasóil o gas natural y obtenemos BTU (o kcal) en forma de vapor. De modo que el primer método establece que la eficiencia o rendimiento de caldera puede ser cifrada directamente a partir del combustible total quemado en un período dado y el agua total evaporada (vapor formado) en el mismo período. Es muy normal cifrar primero la evaporación por libra de combustible quemado (o por kg) y después, a partir de este dato, obtener el rendimiento o eficiencia.

Código de pruebas ASME. Éste es un procedimiento para determinar la producción de las calderas grandes e incluye cálculos de balance térmico. Esto requiere calcular la producción y eficiencia por diferencia o sustracción a partir de la energía del combustible de todas las pérdidas que tienen lugar en una unidad generadora de vapor, tales como:

- Pérdidas debidas a la humedad del combustible.
- Pérdidas debidas al agua que puede formarse del hidrógeno del combustible.
- Pérdidas debidas a la humedad del aire de combustión utilizado.
- Pérdidas debidas al calor, o BTU (kcal) arrastradas por los gases a la chimenea.
- Pérdidas debidas a la combustión incompleta del carbón en el combustible.
- Pérdidas debidas a los combustibles no consumidos en el residuo sólido o cenizas.
- Pérdidas debidas al hidrógeno e hidrocarburos no quemados del combustible.
- Pérdidas debidas a la radiación, fugas y otras pérdidas no tenidas en cuenta.

El Capítulo 15 explica y cita algunos métodos de cálculo de la eficiencia de calderas y los sistemas utilizados para aumentar la eficiencia tal y como se aplican a las plantas de calderas más pequeñas.

DEFINICIONES DE CALDERA

Las siguientes definiciones de caldera generalmente se encuentran en forma de leyes estatales y códigos de caldera referentes a requisitos de instalación o inspección, así como leyes de ingeniería para operar este tipo de equipos.

Una *caldera* es un recipiente a presión cerrado en el que se calienta un fluido para uso externo del mismo por aplicación directa del calor resultante de la combustión de un combustibles (sólido, líquido o gaseoso) o por utilización de la energía nuclear o eléctrica.

Una *caldera de alta presión* es aquella que genera vapor a una presión mayor de 15 psig (1,05 kg/cm^2) manométricos (1,05 atmósferas efectivas o manométricas). Por debajo de esta presión se clasifican como calderas de vapor de baja presión. Las pequeñas calderas de alta presión se denominan calderas miniatura según la normativa de Estados Unidos*.

De acuerdo a la sección 1 del código de calderas y recipientes a presión de la ASME (American Society of Mechanical Engineering) una caldera miniatura de alta presión es una caldera de alta presión que no excede de los límites siguientes: 16″ (406,4 mm) de diámetro interior de virola (o chapa envolvente cilíndrica); cinco pies cúbicos (0,1.415 m^3) de volumen bruto de virola y aislamiento; y 100 psig (7 kg/cm^2 efectivos o manométricos) de presión. Si se exceden estos límites, se trata de una caldera de potencia. La mayoría de los estados en Estados Unidos siguen esta definición. Los requisitos de la soldadura para estas calderas pequeñas no son tan severos como para las grandes.

Una caldera de potencia es una caldera de vapor de agua o de fluido que trabaja por encima de 15 psig (1,05 kg/cm^2) y excede el tamaño de una caldera miniatura. Esto también incluye el calentamiento de agua caliente o calderas de agua caliente que funcionan por encima de 160 psi (11,2 kg/cm^2) o 250 °F (121,1 °C). Las calderas de potencia también se llaman calderas de alta presión.

Una *caldera de baja presión* se define como una caldera de vapor que trabaja por debajo de 15 psig (1,05 kg/cm^2) de presión o una de agua caliente que funciona por debajo de 160 psig (11 kg/cm^2) o 250 °F (121 °C).

Una *caldera de calefacción* por agua caliente es una caldera que no genera vapor, pero en la cual el agua caliente circula con propósitos de calefacción y después retorna a la caldera y que trabaja a presiones que no exceden de 160 psig (11,2 kg/cm^2) o de una temperatura de agua no mayor de 250 °F (121 °C) en o cerca de la salida de caldera. Estos tipos de calderas se consideran calderas de calefacción

---

* *N. del T.:* En España, según la normativa legal técnica del Ministerio de Industria y Energía, las calderas se clasifican en las categorías siguientes, desde el punto de vista de la seguridad y a efectos de las condiciones exigibles a su emplazamiento en función del producto V × P (V es el volumen de agua, en m^3, a nivel medio o el volumen total de agua en la caldera sin nivel definido, y P es la presión total de servicio, kg/cm^2):

Categoría A: $V \times P > 600$

Categoría B: $10 < V \times P \leqslant 600$

Categoría C: $V \times P \leqslant 10$

de baja presión*, construidas bajo las especificaciones de la Sección IV del código ASME de calderas. Si se exceden las condiciones de presión o temperatura, las calderas deben diseñarse como de alta presión común bajo las especificaciones de la Sección I del Código.

Una *caldera de suministro de agua caliente* o, más brevemente dicho, una caldera de agua caliente, está completamente llena de agua y suministra agua caliente para usarse en el exterior de ella (sin retorno) a una presión que no excede de 160 psig (11,2 kg/cm^2) efectivos o a una temperatura de agua que no pase de 250 °F (121 °C). Estos tipos de caldera se consideran también calderas de baja presión, construidas según los requisitos de la Sección IV (calderas de calefacción) del código ASME. Si se sobrepasan la presión o temperatura, estas calderas deben diseñarse como calderas de alta presión.

Una *caldera de calor perdido* utiliza subproductos térmicos como gases de hornos de laminación o siderurgia, gases de escape de una turbina de gas o subproductos de un proceso de fabricación. El calor residual se pasa por unas superficies de intercambio térmico para producir vapor o agua caliente para uso convencional. Las mismas normas básicas del código ASME de construcción se aplican a todas calderas de recuperación de calores perdidos al igual que se aplican a las calderas calentadas por combustibles convencionales, y los equipos auxiliares y de seguridad normalmente requeridos en una caldera se precisan también para una unidad de calores perdidos.

Los ingenieros prefieren utilizar el término generador de vapor en vez de caldera de vapor, porque el término caldera se refiere al cambio físico del fluido contenido, mientras que generador de vapor cubre la totalidad del aparato en el que el cambio físico está teniendo lugar. Pero en su utilización normal, ambos términos son básicamente lo mismo. La mayoría de las leyes estatales están aún escritas bajo la vieja nomenclatura básica de calderas.

Una *caldera compacta* es una caldera completamente montada en fábrica, de tubos de agua, de tubos de humos o de fundición, e incluye quemador, controles y elementos de seguridad. Una caldera montada en fábrica es más barata que una unidad montada en campo, de la misma capacidad de producción de vapor. Mientras que una caldera montada en fábrica no es una caldera fuera de serie, generalmente puede montarse y entregarse mucho más rápidamente que una caldera montada en campo, los tiempos de instalación y puesta en marcha son sustancialmente más cortos. Los trabajos realizados en fábrica normalmente pueden ser mejor supervisados y realizados a coste más bajo.

Una *caldera supercrítica o hipercrítica* funciona por encima de la presión crítica absoluta de 3206,2 psi (224,43 kg/cm^2) y 705,4 °F (374 °C) de temperatura de saturación. El vapor y el agua tienen una presión crítica de 224,43 kg/cm^2. A esta presión el vapor y el agua tienen la misma densidad, lo que significa que el vapor está comprimido tan intensamente como el agua. Cuando esta mezcla se calienta por encima de la temperatura de saturación correspondiente (de 705,4 °F (374,1 °C)) para esta presión, se produce vapor seco sobrecalentado capaz de realizar trabajo útil por su presión elevada. Este vapor seco está especialmente indicado para mover turbogeneradores.

---

* *N. del T.:* En España, pertenecientes a la categoría C.

Las calderas de presión supercríticas son de dos tipos: de paso directo y de recirculación. Ambos tipos operan en el rango por encima de los 224,43 kg/cm^2 y 374 °C. En este rango las propiedades del líquido y del vapor saturado son idénticas; no hay cambio en la fase líquido-vapor por lo que no existe nivel del agua y, por lo tanto, no se precisa calderín.

Las calderas se clasifican también por la naturaleza de los servicios prestados. Las clasificaciones tradicionales son: estacionaria, portátiles, de locomotora y marinas, definidas como sigue. Una *caldera estacionaria* es la instalada permanentemente en una posición fijada en un lugar. Una *caldera portátil* está montada sobre un camión, barco, pequeño bote de río u otro aparato móvil. Una *caldera de locomotora* es una caldera diseñada especialmente para vehículos de tracción autopropulsados sobre raíles (también se usa para servicio estacionario). Una *caldera marina* es normalmente una caldera de tipo especial de cabezal bajo destinada para barcos de carga y pasajeros con una capacidad de vaporización inherente rápida.

El *tipo* de construcción también diferencia las calderas como sigue: las *calderas de fundición* son unidades de calefacción de baja presión construidas por secciones de fundición a presión de acero, bronce o latón. Los tipos normales fabricados son clasificados por el modo en que se disponen o ensamblan las secciones de fundición por medio de conectores o niples, colectores exteriores y manguitos roscados. Hay tres tipos de calderas de fundición:

1. Calderas verticales de fundición de secciones colocadas o montadas verticalmente una encima de otra, similar a los *pancakes* con accesorios de conexión que unen las secciones.
2. Calderas horizontales de fundición por secciones conectadas o ensambladas horizontalmente de modo que las secciones se mantienen juntas como rebanadas en una hogaza de pan (son las calderas de calefacción más conocidas y utilizadas en España).
3. Pequeñas calderas de fundición también construidas en una pieza o molde simple de pieza única. Éstas son generalmente pequeñas calderas usadas principalmente en el pasado para servicios de agua caliente. Véase el Capítulo 3 sobre calderas de fundición para más detalles constructivos.

Las *calderas de acero* pueden ser de alta presión o de baja presión y, hoy en día, son normalmente de construcción soldada. Están divididas en dos clases:

1. En las calderas de tubos de fuego o tubos de humos, los productos de la combustión pasan a través del interior de los tubos con el agua rodeándolos por el exterior. Las calderas de tubos de humos se describen con detalle en los capítulos posteriores.
2. En las calderas de tubos de agua, el agua pasa o circula por el interior de los tubos y los productos de la combustión rodean a los tubos por su parte exterior.

Las calderas de tubos de humos generalmente son utilizadas para capacidades hasta 22.000 kg por hora y presión de 21 kg/cm^2. Por encima de esta capacidad y presión, se usan las calderas de tubos de agua. Las calderas de tubos de humos o pirotubulares se clasifican como calderas de virolas de chapa o cilíndricas. El agua y el vapor están recluidos en la virola o cilindro de chapa. Esta disposición limita el volumen de vapor que puede generase sin hacer las virolas demasiado grandes y, con

respecto a la presión, el espesor de chapa requerido sería demasiado grande como para fabricarlas en altas presiones.

Terminología de la capacidad o producción de calderas. La capacidad o la potencia de caldera puede expresarse en HP (caballos), kg/hora (o libras/hora), kcalorías/hora (BTU/hora) y, para calderas de centrales, la capacidad de generación tan grande puede darse en megawatios de electricidad. Las calderas de calefacción pueden tasarse en HP, libras/hora (kg/hora) y BTU/hora (kcal/hora), pero sus capacidades son también descritas en términos relacionados con la superficie de transferencia térmica necesaria para un espacio. Por ejemplo, metros cuadrados equivalentes (o pies cuadrados) de superficie radiante de vapor es una medida del área de transferencia térmica necesaria en un edificio que utiliza vapor como fuente de calor.

Un *caballo de caldera* (HP de caldera) se define como la evaporación en términos de vapor saturado seco de 34,5 libras/hora de agua (15,65 kg/hora) a temperatura de 100 °C (212 °F). Así pues, un HP de caldera, por este método, es equivalente a una capacidad de 33,47 BTU/hora (8.435,7 kcal/hora) y se toma normalmente como una superficie de calefacción de caldera de diez pies cuadrados (0,92 metros^2). Pero diez pies cuadrados de superficie calefactora en una caldera moderna genera en cualquier caso de 50 a 500 libras/hora de vapor (22,7 kg/hora a 227 kg/hora). Hoy en día la capacidad de producción de las calderas grandes está establecida en tantos kg/hora de vapor o BTU/hora (kcal/hora) o megavatios de potencia producida.

El término superficie de calefacción se usa también para definir o cifrar la capacidad de una caldera. La superficie de calefacción de una caldera es el área, expresada en metros cuadrados (o pies cuadrados) que está expuesta a los productos de la combustión. Se deben considerar las siguientes partes en la superficie de caldera para determinar la cantidad de superficie de calefacción disponible para la producción de vapor o agua caliente: tubos, cajas de humos, superficies de virola (hogar), chapas de encastramiento de tubos, colectores principales de caldera y otras.

Puede hacerse una comparación de capacidades de producción basada en HP, superficie de calefacción y producción en kg/hora, suponiendo que una caldera tiene una capacidad nominal de 500 HP:

1. La superficie de calefacción sería de 5.000 pies cuadrados (464,5 m^2) bajo la antigua norma de diez pies cuadrados/HP (0,929 m^2/HP).
2. La capacidad de vapor en libras/hora (kg/hora) sería de:

$$500 \times 34{,}5 = 17.250 \text{ libras/hora } (7.825 \text{ kg/hora}).$$

3. Para una caldera de calefacción de agua caliente, la capacidad sería de:

$$500 \times 33.475 = 16.737.500 \text{ BTU/hora} = 4.217.850 \text{ kcalorías/hora}.$$

El sistema de producción en libras/hora (o kg/hora), garantizada a menudo por el fabricante, es una medida de la capacidad a la cual una caldera puede funcionar en continuo. La producción punta de una caldera durante un período de dos horas se ajusta normalmente a un 10 a 20 por 100 sobre el máximo continuo de capacidad. La producción en kg/hora (o libras/hora) normalmente se expresa en kg de vapor a la temperatura y presión de diseño de la caldera. Las calderas de baja presión se tasan

también por los requisitos del código de calefacción del contratista, así como en kg/hora o kcalorías/hora.

En *cálculos de carga de calefacción* se usan los términos: tarado IBR, tarado SBI y tarado EDR. Estos términos afectan a la capacidad de producción de una caldera. Así pues son importantes para determinar el tamaño de una caldera para calentar un espacio determinado. También afectan a la válvula de seguridad requerida en una caldera. Se definen como sigue.

El acrónimo o las siglas IBR*, establecido por el Instituto de fabricantes de calderas y radiadores, es el que tasa y determina los valores de las calderas de fundición. Normalmente las calderas taradas IBR tienen una placa indicadora de la capacidad bruta y neta en BTU/hora (kcalorías/hora). La capacidad bruta está definida como la capacidad neta más un plus de holgura para la puesta en marcha, la carga punta y las pérdidas térmicas de la tubería. La capacidad neta definiría el efecto real térmico producido. El código ASME establece que es la capacidad bruta del equipo la que determina la capacidad a especificar para la válvula de seguridad.

El acrónimo o las siglas SBI** está establecido por el Instituto de calderas de acero. La chapa o placa de datos muestra que el tarado de caldera por el SBI no es uniforme, pero el modelo o número de producto debe ser grabado. El catálogo del fabricante mostrará normalmente un tarado SBI y un tarado neto SBI. El tarado SBI tiende a mostrar la suma del tarado neto SBI más un 20 por 100 extra para pérdidas de tuberías, no incluyendo la carga punta anotada bajo el tarado IBR. Así, es difícil obtener la verdadera capacidad bruta para determinar la capacidad de la válvula de seguridad a partir de estos datos. Pero el SBI exige el número de metros cuadrados (o pies cuadrados) de superficie calefactora que ha de grabarse*** sobre la caldera. Con ello, se utiliza la regla ASME de capacidad mínima de la válvula de seguridad en libras/hora (kg/hora) por metro cuadrado (o pie cuadrado) de superficie de calefacción.

La norma EDR**** se establece para la radiación directa equivalente. Específicamente se refiere a la superficie de radiación de vapor en pies cuadrados (metros cuadrados). Se define como una superficie que emite 240 BTU/hora (60,5 kcal/hr) con una temperatura de vapor de 215 °F (101,7 °C) a una temperatura de habitación de 70 °F (21 °C). Con calefacción por agua caliente se usa el valor de 150 BTU/hora (37,8 kcalorías/hora) con una caída de 20 °F (6,7 °C) entre el agua de salida y la de retorno. Este término se utiliza por los arquitectos e ingenieros de calefacción para determinar el área del equipo de transferencia térmica requerida para calentar un espacio. De este modo, la capacidad de caldera se obtiene indirectamente por suma de las EDRs.

En las especificaciones de calderas de calefacción a menudo se anotan también los siguientes tarados o normas (sobre todo en Estados Unidos; en España, sólo se

---

* IBR: Institute of Boiler and Radiator Manufacturers.

** SBI: Steel Boiler Institute.

*** EDR: Equivalent Direct Radiation: Radiación Directa Equivalente.

**** *N. del T.:* En España, los valores de tara de capacidad y presión máxima de trabajo están grabados o punzonados oficialmente por Industria en la chapa o placa punzonada oficialmente por el Ingeniero de Industria, normalmente después de realizada la prueba de presión hidrostática de la caldera en su emplazamiento definitivo y regrabada anualmente o siempre que se realicen modificaciones o reparaciones de importancia en el diseño o dispositivos de la caldera.

señalan la capacidad térmica, presión de trabajo, fabricante y número de serie o modelo y número de fabricación, según está normalizado):

Tarado de la *American Gas Association.* Este sistema de tarado se utiliza por la Asociación Americana del Gas (AGA) y se aplica a calderas diseñadas para calefacción por gas. El tarado o capacidad se expresa como capacidad máxima de caldera en BTU/hora (kcal/hora) y refleja el 80 por 100 del tarado de entrada aprobado por la AGA según se determina por pruebas de determinación de rendimiento descritas en la norma «American Standard Approval» («requisitos americanos normales de aprobación para aplicaciones de calefacción central»). Para todos los efectos prácticos, los tarados AGA son equivalentes a los tarados brutos SBI e IBR.

Tarado de la Asociación de Contratistas Mecánicos. La Asociación de Contratistas Mecánicos (MCA) de América (antiguamente, Asociación Nacional de Contratistas de calefacción, tuberías y aire acondicionado) ha adoptado métodos para tarar calderas que están expresados en base a la carga neta en pies cuadrados de superficie de radiación equivalente (EDR) de vapor.

La MCA ha adoptado también un código de pruebas y tarado para unidades caldera-quemador que ellos aplican al tarado de tipos de calderas comerciales de calefacción de chapa calentada con combustible líquido o gaseoso. Este código permite un tarado elevado, mayor que el que se permite por el código SBI. Se establece una capacidad bruta con ciertos factores limitadores que se aplican a la temperatura de los gases de salida, dióxido de carbono, rendimiento y calidad del vapor. Esta capacidad se divide por 1,5 para determinar la capacidad neta MCA.

Tarado de la Asociación Americana de Fabricantes de Calderas. Este método de tarado, desarrollado por la rama de calderas compactas pirotubulares de la ABMA (Asociación Americana de Fabricantes de Calderas), es suscrito normalmente por los constructores de calderas compactas y por unos pocos constructores de calderas de fundición y de acero. Las tasas se establecen mediante pruebas de rendimiento de acuerdo con el código de pruebas ASME para unidades generadores de vapor y expresan normalmente un máximo garantizado de capacidad en BTU (kcal) en la tobera de salida o un tarado similar de salida.

CLASIFICACIÓN POR EL SISTEMA DE APLICACIÓN

Las especificaciones del sistema de caldera darán una idea inmediata de la capacidad, presiones y temperaturas que se requerirán. Otra especificación importante es la del combustible, así como su valor para la planta. Los sistemas pueden agruparse según las aplicaciones siguientes:

1. Sistema de calefacción a vapor.
2. Sistema de calefacción por agua caliente.
3. Sistema de proceso de vapor a alta presión.
4. Sistema de generación eléctrica a vapor, usando combustibles fósiles.
5. Sistema de generación eléctrica a vapor, usando combustible nuclear.

6. Sistema que utiliza un fluido de trabajo diferente del agua, como «dowtherm»* para uso en procesos de alta temperatura y baja presión. Estos sistemas están referidos por el código ASME como sistemas de calefacción por fluido orgánico (véase el Capítulo 4).

Sistemas de caldera de calefacción a vapor (Fig. 1.6). Las calderas de calefacción a vapor son normalmente unidades de baja presión de construcción en acero o fundición, aunque las calderas de acero de alta presión pueden usarse también para grandes edificios o zonas de complejos grandes. Normalmente si se hace esto, válvulas reductoras de presión en las líneas de vapor bajan la presión en los radiadores, convectores o baterías de vapor. El término calefacción a vapor también implica que generalmente todos los condensados retornan a la caldera en un sistema de circuito cerrado. La presión máxima permitida en una caldera de calefacción a vapor de baja presión es de 1,05 bar. Las calderas de fundición para utilización de vapor están limitadas a una presión de trabajo (MWP) de 1,05 kg/cm^2 por el código ASME de calderas y calefacción. Las calderas de fundición están restringidas específicamente por el código ASME, Sección IV, para ser utilizadas exclusivamente para calefacción de vapor de baja presión. Si se utilizan para trabajo en proceso, significaría servicio pesado de vaporización continua y gran cantidad de agua de reposición. Esto produciría rápidos cambios de temperatura en una caldera de fundición, produciéndose tensiones y roturas de piezas. De este modo, el Código restringe su uso para el servicio de calefacción a vapor solamente.

Los sistemas de calefacción a vapor utilizan sistemas de retorno por gravedad o por condensación mecánica. Sus diferencias son las siguientes. Cuando todos los elementos de calefacción (como radiadores, convectores y baterías de vapor) están colocados por encima de la caldera y no se utilizan bombas, se denomina retorno por gravedad, a todos los retornos de condensado a la caldera por gravedad. Si hay instalados purgadores o bombas para ayudar al retorno de condensados, el sistema se denomina de retorno mecánico. Además de los purgadores, este sistema normalmente comprende un depósito de condensados, una bomba de condensados o un tanque o bomba de vacío (Fig. 1.6*c*).

Dispositivos de protección requeridos por la Sección IV del código ASME. Como consecuencia de serias explosiones ocurridas en calderas de baja presión en el pasado, el código ASME requiere controles redundantes para calderas con tasas de entrada térmica de más de 200.000 BTU/hora (50.400 kcal/hora). Estas calderas trabajan automáticamente, sin prácticamente atención de ningún operario, y sólo se efectúan controles de limpieza por el propietario o un operario. Ésta es la razón por la que ASME requiere para calderas de vapor lo siguiente:

1. Cada caldera de calefacción a vapor debe tener un manómetro de presión de vapor con una escala graduada a no menos de 2,1 kg/cm^2 ni a más de

* *N. del T.:* Producto líquido sintético fabricado por la casa DOW CHEMICALS. Su característica principal es la de permanecer líquido hasta muy elevada temperatura y además a muy bajas presiones.

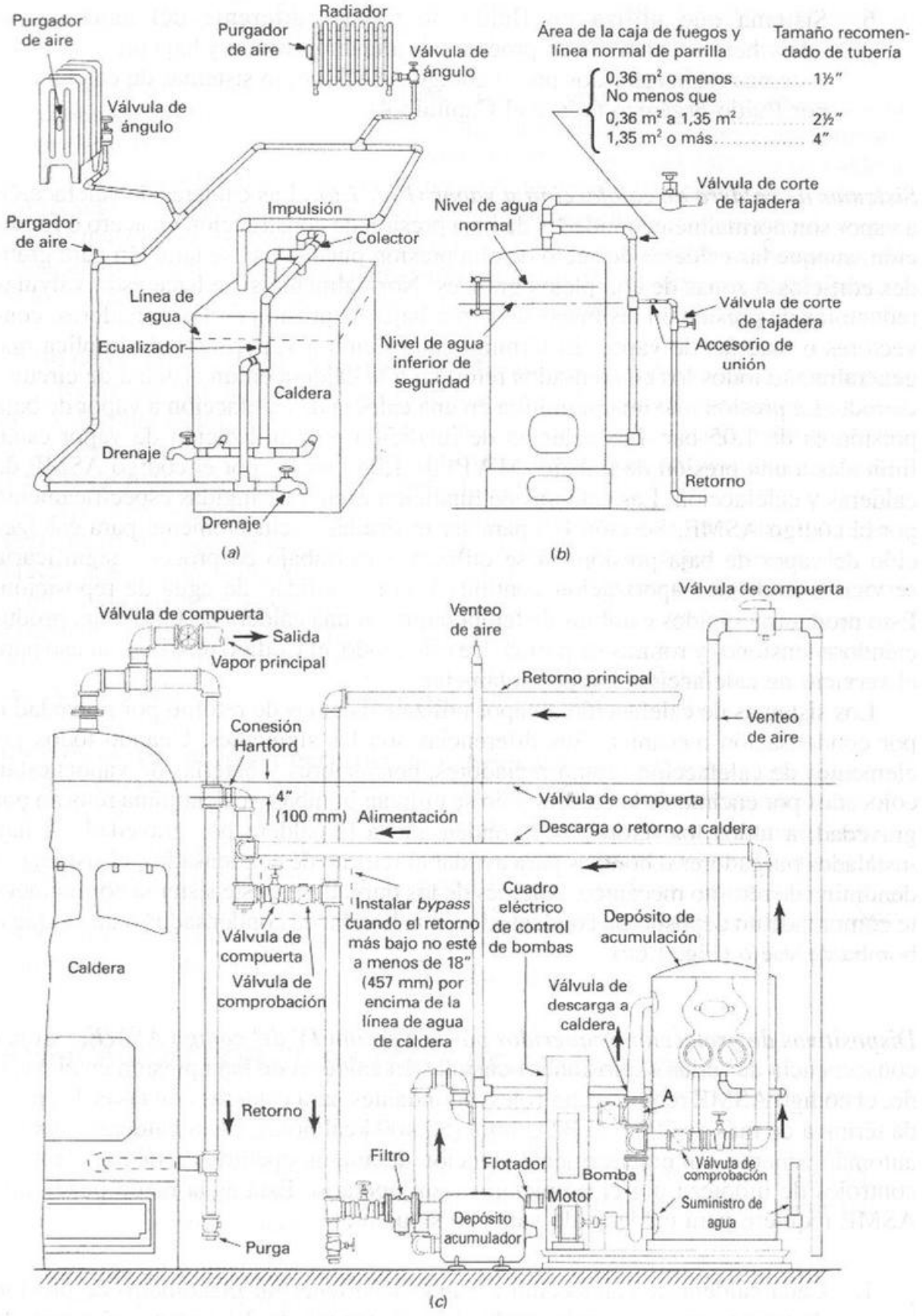


Figura 1.6. Sistemas de calefacción por vapor. (*a*) Sistema monotubular de venteo de aire. (*b*) Bucle de retorno de tubería de tipo Hartford. (*c*) Sistema de tubo de retorno en vacío.

4,2 kg/cm^2. Las conexiones a la caldera no deben ser de menos de 1/4" (6,35 milímetros) de diámetro de tubería normal, pero si se utiliza tubo de acero estirado, no debería ser menor de 1/2" (12,7 mm) de diámetro.

2. Cada caldera de vapor de tener un nivel de agua de vidrio conectado a la caldera por válvulas no menores de 1/2" (12,7 mm) de diámetro y con un drenaje en el nivel de vidrio no menor de 1/4" (36,35 mm). La parte visible del vidrio de nivel de agua debe estar a no menos de 1" (25,4 mm) por encima del mínimo nivel permisible de agua estipulado por el fabricante de la caldera.
3. Dos controles de presión se necesitan en las calderas de calefacción de vapor automáticas:
   a) Un control de corte por presión que corta o cierra el suministro de combustible cuando se alcanza la presión de trabajo deseada.
   b) Un control de límite superior no mayor de 1,05 kg/cm^2 que haga retroceder el control de límite de presión de trabajo de forma que corte o cierre el combustible cuando el control de presión de trabajo no funciona.
4. Una caldera de calefacción a vapor automática debe tener un control por bajo nivel de agua de corte de combustible colocado de forma que el dispositivo cortará el suministro de combustible cuando el nivel de agua caiga por debajo de la parte inferior visible del nivel de vidrio de agua. Las válvulas de corte de combustible por bajo nivel deben estar conectadas a la caldera mediante «tes» (T) de material no ferroso sobre «íes» (Y) de tamaño no menor de 1/2" (12,7 mm) de diámetro de tubo y deben tener grifos de drenaje de no menos de 3/4" si están incorporados a una cámara del dispositivo de corte por bajo nivel, de forma que la cámara y el tubo de conexión puedan limpiarse periódicamente de lodos. Este drenaje también permite comprobar si el dispositivo de bajo nivel corta el combustible a medida que baja el nivel de agua y aire en la cámara durante la purga*.
5. Cada caldera de calefacción a vapor debe tener, al menos, una válvula de seguridad del tipo cargada a resorte, ajustada y sellada para descargar a una presión no mayor que la máxima permisible de la caldera. Ninguna válvula de seguridad puede ser menor de 1/2" (12,7 mm) de diámetro o mayor de 4 $^1/_2$" (114,3 mm) de diámetro. La capacidad de las válvulas de seguridad debe exceder el caudal de salida por encima de la máxima presión admisible de la caldera de la caldera en libras/hora o kg/hora, pero en ningún caso debería ser menor de esa capacidad de forma que en el equipo de combustión, a su capacidad máxima, la presión no pueda exceder de 5 psi (0,35 kg/cm^2) por encima de la presión máxima admisible de la caldera.
6. Todo el circuito eléctrico de control en calderas automáticas de calefacción a vapor está puesto a tierra positivamente y trabajará a 150 voltios (V) o menos de tensión. El sistema de cableado debe incluir un neutro a tierra así como también todos los equipos estarán puestos, o sea, conectados a tierra.

---

* *N. del T.:* La purga es el sistema por el cual se baja la concentración de sólidos, lodos y sales del agua de la caldera hasta situarla dentro de los límites admisibles (p.p.m.) de la caldera según sus características de presión y temperatura de trabajo.

7. Las calderas de calefacción a vapor automáticas deben estar equipadas con seguridad de llama*, y sus controles de corte y seguridad, según se indica en los controles para calderas de calefacción de agua caliente.

Las válvulas de corte en la línea de suministro de vapor no se requieren para la instalación de una sola caldera que se utilice para calefacción a baja presión, si no hay otras restricciones en las líneas de vapor y condensados y todo el condensado se retorna a la caldera. Pero si se coloca una válvula de corte (o purgador) en la línea de retorno de condensado, se necesita una válvula en la línea de suministro de vapor. También se necesita válvula de corte en la línea de suministro de vapor cuando se usa más de una caldera de calefacción en la misma línea o sistema de suministro de vapor y también sobre la línea de retorno de condensados a cada caldera.

Sistemas de agua caliente. Como punto de partida hay tres clases generales de sistemas de agua caliente: sistemas de suministro de agua caliente (en España, ACS) para lavado y usos similares; sistemas de calefacción espacial del tipo de baja presión, a menudo denominados sistemas de calefacción de edificios (véase la Figura 1.7 de la página 26) y sistemas de agua de alta temperatura y alta presión, también denominamos sistemas «*supertherm*», operando a temperaturas de más de 250 °F (121 °C) y presiones de más de 360 psi (11,2 kg/cm^2) (véase el Capítulo 4)**.

Ambos sistemas, los de calefacción por agua caliente y los de agua a alta temperatura, requieren algún tipo de vaso de expansión para permitir la dilatación del agua cuando se calienta, sin permitirse un aumento correspondiente de presión. Un problema corriente de los sistemas de calefacción-agua caliente es que el vaso de expansión pierde su colchón de aire, de forma que el sistema de agua no puede expandirse sin elevar la presión del sistema. Si este problema se desprecia, la presión puede subir hasta el punto de que la válvula de seguridad puede abrirse y tirar agua. Así, es necesario un chequeo periódico de la presión y un posible drenaje del vaso de expansión puede ser necesario para restablecer el colchón de aire.

Dispositivos protectores para sistemas de calefacción y agua caliente. El código ASME de calderas de calefacción requiere algunos dispositivos protectores mínimos en los sistemas de calefacción y ACS. Entre ellos están los siguientes:

1. Un manómetro o medidor de altura de columna de agua se necesita en la caldera de agua caliente, con una escala y dial graduada a no menos que 1,5 veces (y no más de tres veces) la presión a la que está tarada la válvula de seguridad.
2. Un termómetro o dial (circular, lineal o de capilla) se necesita en la caldera de agua caliente que esté conectado y localizado de modo que pueda leerse cuando la presión o altura de agua de la caldera sea efectiva. La graduación del termómetro debe ser en grados centígrados (en grados Farenheit, en Estados Unidos) y el termómetro debe situarse de modo que la temperatura del agua de la caldera se puede mirar en o cerca de la salida del agua caliente.

---

* *N. del T.:* Por célula fotoeléctrica o dispositivo iónico o similar que corte el suministro de combustible a la caldera si el aparato no detecta llama o ésta se apaga.

** *N. del T.:* Conocidos en España como sistemas de agua sobrecalentada.

3. Se necesitan dos controles en las calderas automáticas de agua caliente:
   a) Un control operativo del límite de trabajo que corte el suministro de combustible cuando la temperatura del agua alcance el límite operativo deseado.
   b) Un control de límite superior que realimente el control operativo del límites y corte el suministro de combustible. Este control de límite superior está ajustado a una temperatura por encima de la de trabajo deseada, pero debe ajustarse de modo que la temperatura del agua no exceda de 250 °F (121 °C) en la salida de la caldera.
4. Un control de corte por bajo nivel de agua se necesita en las calderas automáticas de agua caliente alimentadas con combustible con potencias térmicas superiores a 400.000 BTU/hora (100.000 kcal/hora). Debe instalarse de forma que corte el combustible cuando el nivel de agua caiga por debajo del nivel de seguridad admisible establecido por el fabricante de la caldera.
5. Todo el circuito eléctrico de control en las calderas automáticas de agua caliente alimentadas con combustible, así como en las de calefacción a vapor, debe estar puesto a tierra positivamente y debe operarse a 150 voltios o menos. El sistema de cableado debe incluir asimismo un neutro así como equipo de puesta a tierra (cableado y «picas» de toma de tierra).
6. Una caldera de calefacción de agua caliente debe estar equipada con válvulas de seguridad de muelle aprobadas por el código ASME y ajustadas a o por debajo de la presión máxima admisible de la caldera. El tamaño mínimo de válvula es de 3/4″ (19 mm) y el máximo permitido es de 4,5″ (114,3 mm). La capacidad debe ser mayor que la de salida de caldera (marcada) pero en ningún caso deberá subir la presión más de un 10 por 100 por encima de la máxima presión admisible, si el equipo de combustión trabaja a su capacidad máxima.
7. Las calderas automáticas de combustible líquido o gaseoso y de vapor o agua caliente de calefacción deben estar equipadas con controles de seguridad de llama que corten el combustible cuando haya una combustión inadecuada en el quemador. El código ASME hace referencia a otras normas nacionales reconocidas para mayores requerimientos. Éstos normalmente comprenden la provisión de llama piloto y principal, así como ciclos de encendido, post encendido y barrido por purga*.

Las válvulas de seguridad oficialmente taradas por ASME deben utilizarse en calderas de calefacción por agua caliente. Una válvula de seguridad tarada oficialmente lo está para su presión de ajuste o tarado y para su capacidad de alivio en BTU/hora (o kcal/hora). También debe estar equipada con una palanca manual de prueba; debe cargarse a resorte o muelle y no debe ser del tipo de ajuste de tornillo y tuerca.

---

* *N. del T.:* Es decir, eliminación del hogar de todos los calentadores gases o líquidos mediante un ciclo de barrido o soplado por aire, de modo que se impida la explosión por acumulación de los mismos al intentar un nuevo encendido, sobre todo si es automático. Se supone que, en el encendido manual, el operador debe controlar si han quedado restos de combustible y eliminarlos previamente.

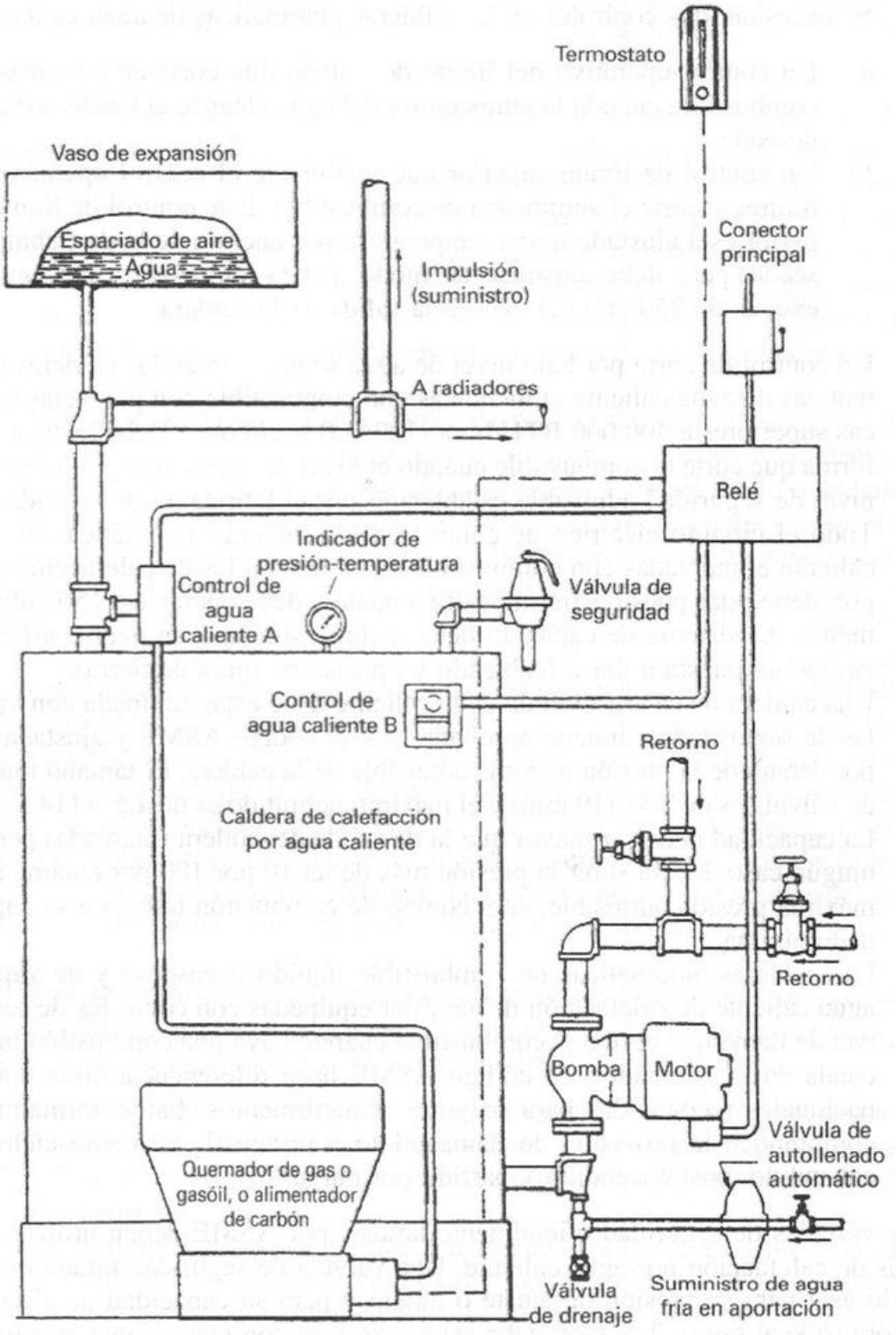


Figura 1.7. Componentes necesarios para un sistema de calefacción por agua caliente.

El *nivel bajo* de agua puede ocurrir en una caldera de tipo de calefacción-agua caliente por diversas razones como las siguientes: (1) pérdida de agua debida a falta de control o vigilancia en: (*a*) drenaje de la caldera para reparación o parada veranie-

ga sin eliminar la posibilidad de encendido, (*b*) extracción de agua caliente de la caldera; (2) pérdida de agua en el sistema de distribución a causa de: (*a*) fugas en la tubería causadas por roturas, dilatación o corrosión, (*b*) fugas en la caldera, (*c*) fugas a través de la bomba u otro equipo en operación; (3) descarga de la válvula de seguridad por exceso de calentamiento; (4) línea de agua de alimentación municipal obstruida o cerrada.

Además, adicionalmente a la válvula de seguridad de presión, debería instalarse un dispositivo de corte de combustible por bajo nivel de agua en toda caldera automática alimentada por combustible.

Sistemas de vapor para generación eléctrica. La mayor parte de las instalaciones de caldera usadas para generación de energía eléctrica son del tipo supercrítico o subcrítico. El generador de vapor es un elemento importante en la generación de energía eléctrica. La Figura 1.8 de la página siguiente es un diagrama de flujo simplificado de una central eléctrica. Los tres componentes más importantes son el generador de vapor (caldera) mostrado a la izquierda; el grupo turbina-generador eléctrico, mostrado acoplado a la derecha; y el condensador, situado debajo de la turbina. El principal elemento que une las tres partes del equipo es el vapor, a menudo denominado medio de trabajo, producido por una caldera de alta presión. El vapor se desplaza sucesivamente desde la caldera a la turbina y de ésta al condensador. El ciclo de agua de alimentación, también mostrado en el diagrama, completa este circuito haciendo el flujo continuo desde el condensador hasta la caldera. Así, a la elevada temperatura final del ciclo, el generador de vapor transfiere o convierte energía calorífica del combustible a la energía térmica en forma de vapor de agua sobrecalentado. La turbina después transforma el calor del vapor en trabajo mecánico y acciona el generador eléctrico que está acoplado a ella. El generador a su vez transforma esta energía mecánica en energía eléctrica.

Generación eléctrica nuclear de vapor. El vapor para generación eléctrica se produce también por calor producido en un reactor de energía nuclear. El sistema de reactor de agua en ebullición (BWR) está mostrado en la Figura 1.9*a* de la página 29. La vasija del reactor soporta y contiene el núcleo del reactor y proporciona los caminos necesarios para que el fluido entre en el núcleo y el vapor no lo abandone. El agua que pasa sobre el núcleo caliente genera vapor que fluye a través de los separadores de vapor-agua dentro de la vasija del reactor y después a través de los secadores, donde el contenido de humedad del vapor se reduce. El vapor pasa posteriormente a través de la línea de vapor directamente a la turbina-generador como se ve en la figura. El sistema de reactor de agua presurizada, mostrado en la Figura 1.9*b*, tiene una vasija de reactor y núcleo bastante similar al tipo BWR, pero el fluido pasa a través del reactor (bucle primario) y no se mezcla con el que pasa a través de la línea de vapor en el lado turbina. El calor se transfiere desde el sistema del reactor al sistema turbina en el generador de vapor. Realmente, el agua en el reactor y bucle primario no hierve, incluso a 600 °F (316 °C), por ejemplo, porque está mantenida a muy alta presión. En el generador de vapor, sin embargo, este agua pasa a través de los tubos que están rodeados por el agua del bucle de turbina, que está a una presión mucho menor. Para usar el mismo ejemplo, una transferencia de 500 °F (260 °C) al bucle de presión baja de la turbina es adecuada para hervir el

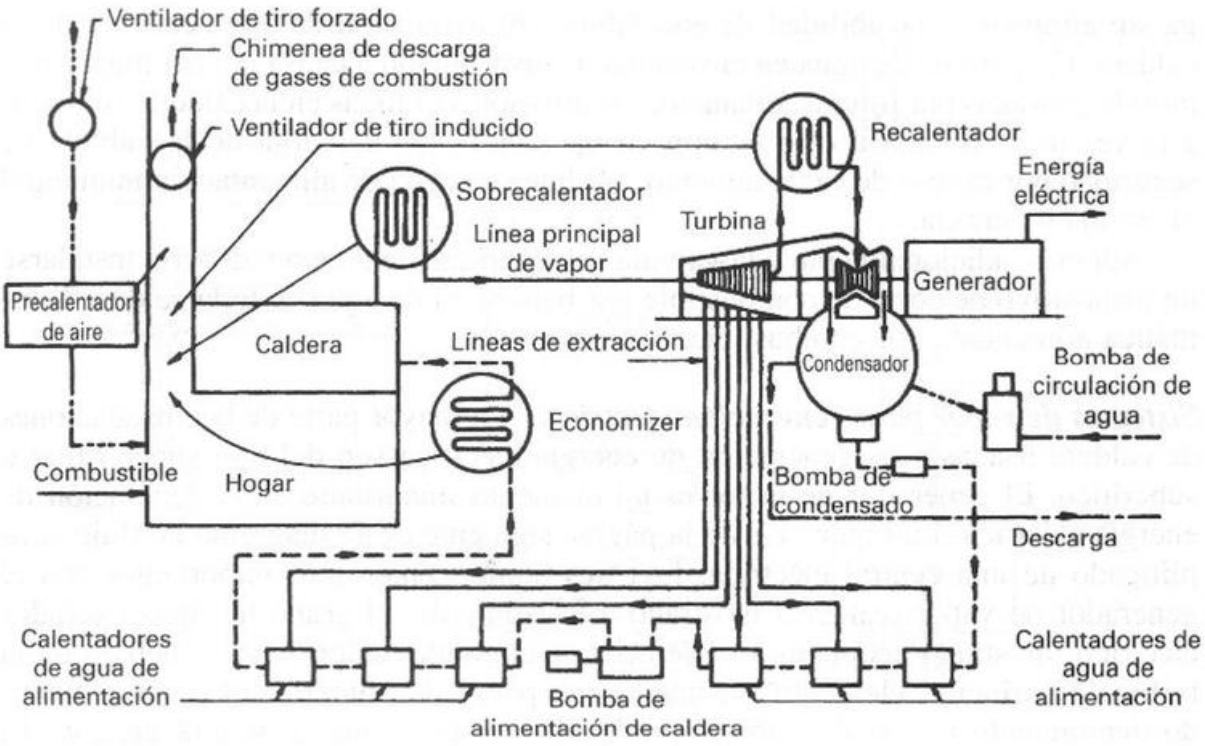


Figura 1.8. Planta generadora de energía eléctrica con caldera de vapor de alta presión y tubogenerador de vapor conectado, condensador, calentadores de agua de alimentación y bomba de alimentación de agua de caldera.

agua y producir el vapor necesario para operar la turbina-generador eléctrico. Habiendo cedido la mayoría del calor, el agua en el bucle primario se bombea al reactor para ser recalentada y utilizada de nuevo, en circuito cerrado.

Sistemas de proceso de alta presión. Los sistemas de proceso de alta presión pueden utilizar calderas pirotubulares o acuotubulares, dependiendo de la presión o capacidad necesarias. El vapor se utiliza para accionamiento mecánico de la turbina o turbogenerador, para accionamiento de compresores, bombas y equipos similares o para los procesos de suministrar alta presión o temperatura para las necesidades del ciclo de fabricación.

ORGANIZACIONES RELACIONADAS CON NORMATIVA

Código ASME de Calderas. El código ASME de Calderas y el Código de inspección del National Board, Asociación Nacional de inspectores de Calderas y Recipientes a Presión, en Estados Unidos, son una fuente importante de documentos para requisitos legales en los diversos estados y municipalidades que han adoptado leyes de seguridad de calderas. Adicionalmente, sirven para mantener activos los comités de calderas y recipientes a presión en orden a tener los códigos publicados al día con la tecnología en avance, así como las ediciones sucesivas del código ASME para fabricantes cualificados, montadores, suministradores de material y propietarios de

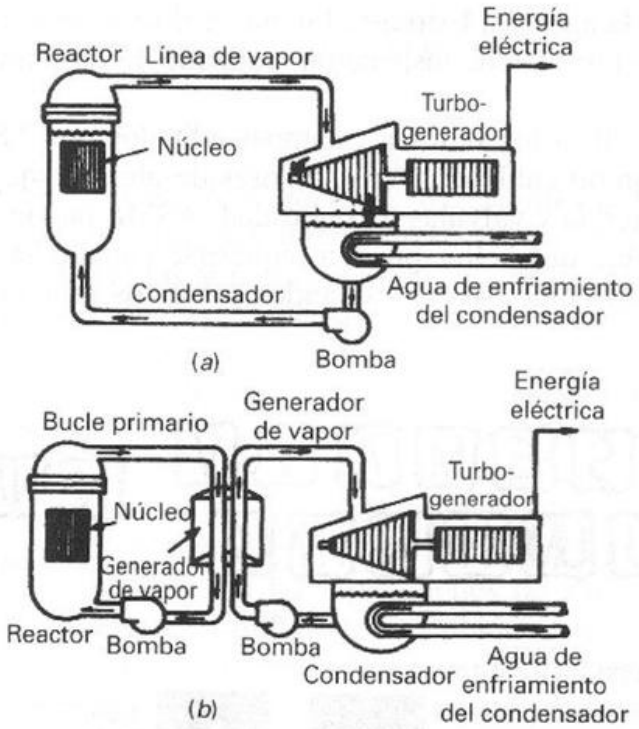


Figura 1.9. Dos tipos de sistemas de reactor de energía nuclear. (*a*) Reactor de agua en ebullición. (*b*) Reactor de agua presurizada.

plantas de energía nuclear con los sellos y marcas de código indicando que el fabricante ha recibido autorización de ASME para construir calderas y recipientes a presión según la citada normativa ASME.

Un requisito fundamental del Código ASME de Calderas y Recipientes a Presión, para ser aprobado oficialmente y designado con el sello ASME, es que se debe sufrir una inspección por parte de un tercer organismo autorizado* durante la construcción para cumplir con los requisitos normativos en vigor. La mayoría de las inspecciones por terceros son llevadas a cabo por inspectores autorizados de calderas y recipientes a presión que tienen experiencia adecuada y han pasado por un examen escrito en una jurisdicción**. Deben estar empleados bien por el Estado o bien por una compañía de seguros autorizada para suscribir seguros de calderas y recipientes a presión en la jurisdicción donde se va a construir la caldera o recipiente a presión, y en algunos casos la situación de la instalación también debe considerarse. Como requisitos uniformes para los inspectores que han sido inspirados e implementados por el National Board de Inspectores de Calderas y Recipientes a Presión, una caldera o recipiente a presión inspeccionada por un inspector acreditado adecuadamente por el National Board será, generalmente, aceptada por todas las jurisdicciones.

El fabricante o contratista que desee construir o montar calderas o recipientes a presión bajo la garantía de un certificado de autorización ASME debe primero ponerse de acuerdo con una agencia de inspección autorizada cuyas inspecciones serán

---

* *N. del T.:* En España, serían los ENICRES (entidades autorizadas por el Ministerio de Industria para realizar oficialmente las inspecciones de calderas).

** *N. del T.:* En España, en las Delegaciones de Industria de las Autonomías correspondientes.

llevadas a cabo por la agencia. Esto usualmente se arregla por ambas partes firmando un contrato por el trabajo de inspección realizado en base a unos derechos de la Agencia Fedataría.

La Figura 1.10*a* lista los sellos a estampar editados por ASME para calderas, recipientes a presión no caldeados, calentadores de almacenaje (acumuladores) de agua, tuberías de energía y válvulas de seguridad. ASME puede suministrar detalles a los fabricantes sobre qué sellos pueden requerirse cuando se consideran componentes de fabricación como los representados por estos sellos o estampas (en alemán, «*stelpen*»).

Figura 1.10. (*a*) Sellos de código ASME aplicable a calderas y componentes nucleares. (*b*) Secciones de Libros del código de calderas requeridos por el código de sellos ASME.

La Figura 1.10*b* lista los sellos requeridos para energía y componentes nucleares, calderas y calefacción eléctrica con los libros del Código ASME para estos sellos.

National Board de Inspectoras de Calderas y Recipientes a Presión. El Comité Nacional de Inspectores de Calderas y Recipientes a Presión está compuesto por los Inspectores Jefes de los estados y municipios de los Estados Unidos y provincias canadienses. Esta organización ha establecido criterios para los requisitos de experiencia de los inspectores de calderas, la promoción y conducción de exámenes uniformes y las pruebas que son utilizadas por las jurisdicciones. El NB edita comisiones para los inspectores que pasen un examen NB, que son aceptados sobre una base recíproca por la mayoría de las jurisdicciones, dando así una característica de «al portador» a la credencial. La organización NB también edita un sello, denominado sello «R» para organizaciones que deseen ser certificadas como «reparadores» normalizados. Esto también se aplica a las reparaciones de válvulas de seguridad y reparaciones de vasijas nucleares a presión que también merecen un sello separado de la NB. Los inspectores de la NB deben obtener un certificado de competencia NB, que cualifica al inspector para efectuar inspecciones de campo in situ para una jurisdicción sobre la base de obtener un mandato jurisdiccional o comisión para realizar estas inspecciones de calderas y recipientes a presión.

Los inspectores NB que realicen una inspección como tercera parte en las instalaciones del fabricante, denominada «inspección en taller», deben pasar otro examen sobre certificado de competencia para poder ser designados por una agencia autorizada de inspección como inspector autorizado para trabajos de inspección según normativa durante la fabricación de una caldera o recipiente presión. Esto se denomina un comisionado NB con un endoso «A». Un programa similar existe (en Estados Unidos) para inspectores NB que realizan su trabajo sobre recipientes nucleares a presión. Unas pruebas especiales (exámenes) sobre aseguramientos de calidad y técnicas no destructivas deberán pasarse antes de que la comisión NB pueda recibir un endoso «N» (nuclear).

La NB tiene una extensa lista de publicaciones y formularios en relación con la seguridad de calderas y recipientes a presión. Su dirección en Estados Unidos es:

National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors
1055 Crupper Ave.
Columbus, OH 43229

Los que emplean a los inspectores comisionados NB deben calificarse como agencias de inspección autorizadas (en España hay entidades colaboradoras del Ministerio de Industria que realizan comisionadas estas tareas y se denominan ENICRES). Éstos son en Estados Unidos cuerpos jurisdiccionales o autorizados o compañías de seguros con licencia para ello. El inspector debe ser contratado por estas agencias por razones de responsabilidad técnica y financiera bajo la presente normativa codificada. Así existen tres tipos de inspectores comisionados. Estos inspectores hacen los informes e inspecciones legales a una o en una jurisdicción en el sentido de que una caldera o recipiente a presión es segura o insegura para trabajar o de que

requiere unas reparaciones antes de poder operarse. Estos tres tipos de inspectores son, a saber:

1. Los inspectores estatales, provinciales o municipales comprueban que se observan todas las provisiones de la ley sobre calderas y recipientes a presión y que se cumplen todas las normas y regulaciones de la jurisdicción. Cualquier orden de estos inspectores debe cumplirse* sin excepción ni cortapisa, e incluso atender las peticiones operativas del propietario u operador.
2. Los inspectores de compañías aseguradoras cualificadas para realizar las inspecciones jurisdiccionales según normativa, y si están comisionados por la ley de la jurisdicción en la cual están localizados, pueden también realizar estas inspecciones periódicas. Como inspectores comisionados exigen el cumplimiento de todas las previsiones legales, normas y reglamentos de las autoridades. Además pueden recomendar cambios que prolongen la vida de la caldera o recipiente a presión.
3. Los inspectores del propietario-usuario son empleados por una compañía para inspeccionar recipientes a presión o sus elementos sólo y no para subcontratación por dicha compañía o sociedad. Deben estar cualificados y amparados por la normativa del estado o municipio de los que han adoptado dicha normativa. La mayoría de los estados no permiten a este grupo de inspectores servir en lugar de los inspectores del estado o de las compañías aseguradoras.

La mayoría de las áreas de Estados Unidos y todas las jurisdicciones en Canadá exigen que las calderas de alta presión sean sometidas a inspección periódica por un inspector** jurisdiccionalmente reconocido. En la mayoría de las jurisdicciones, ésta consiste en una inspección interna anual de las calderas de energía (potencia) e inspección bianual de las calderas de calefacción y normalmente de los recipientes a presión para aquellos estados que han adoptado legislaciones sobre calderas de baja presión o recipientes a presión no calentados.

Si se comprueba que los resultados son satisfactorios, la jurisdicción emite un certificado de inspección, autorizando el uso de la caldera o recipiente durante un período específico de tiempo.

Las Figuras 1.11*a* y *b* y la 1.12 de la página 34 listan los estados, ciudades y condados de los Estados Unidos y provincias de Canadá que tienen alguna forma de instalación y requisitos de inspección sobre calderas y algunos recipientes a presión no calentados. Estas leyes varían mucho. Por ejemplo, sobre calderas de baja presión, los requisitos de reinspección pueden limitarse a instalaciones situadas en locales de concurrencia pública. Otras incluyen todas las calderas de calefacción, excepto aquellas situadas en residencias privadas o en casas de apartamentos con seis familias o menos. Además deberán comprobase las leyes locales o estatales para más requisitos específicos.

---

* Y esto debe estar garantizado.

** *N. del T.:* En España, análogamente, se exige por Industria esta inspección así como la de prueba a presión hidrostática de una vez y media la presión de trabajo, cada vez que se reparen tubos u otros componentes a presión de las calderas industriales.

Estado o provincia	Acepta informes de la compañía de seguros (X = sí)	Necesaria inspección para		
		Calderas de alta presión	Calderas de baja presión	Recipientes a presión (no calderas)
		(*a*) Estados Unidos		
Alaska	X	X	X	X
Alabama	—			
Arizona	X	X	X	—
Arkansas	X	X	X	X
California	X	X	—	X
Colorado	X	X	X	—
Connecticut	X	X	X	—
Delaware	X	X	X	X
Columbia	X	X	X	X
Florida	X	X	X	—
Georgia	X	X	X	X
Hawaii	X	X	X	X
Idaho	X	X	X	X
Illinois	X	X	X	X
Indiana	X	X	X	X
Iowa	X	X	X	X
Kansas	X	X	—	—
Kentucky	X	X	X	X
Louisiana	X	X	X	X
Maine	X	X	X	—
Maryland	X	X	X	X
Massachusetts	X	X	X	X
Michigan	X	X	X	—
Minnesota	X	X	X	X
Mississippi	X	X	X	X
Missouri	X	X	X	X
Montana	X	X	X	—
Nebraska	X	X	X	X
Nuevo México	Sin ley	—	—	—
Nevada	X	X	X	X
New Hampshire	X	X	X	X
New Jersey	X	X	X	X
New York	X	X	X	—
Carolina del Norte	X	X	X	X
Dakota del Norte	X	X	X	—
Ohio	X	X	X	—
Oklahoma	X	X	X	X
Oregon	X	X	X	X
Pennsylvania	X	X	X	X
Rhode Island	X	X	X	X
Carolina del Sur	Sin ley	—	—	—
Dakota del Sur	X	X	X	—
Tennessee	X	X	X	X
Texas	X	X	X	—
Utah	X	X	X	X
Vermont	X	X	X	X
Virginia	X	X	X	X
Washington	X	X	X	X
West Virginia	X	X	—	—
Wisconsin	X	X	X	X
Wyoming	Sin ley	—	—	—
		(*b*) Canadá		
Alberta	No	X	X	X
Columbia británica	No	X	X	X
Manitoba	No	X	X	X
New Brunswick	No	X	X	X
Newfoundland	No	X	X	X
Northwest Territories	X	X	X	X
Nueva Escocia	X	X	No	X
Ontario	X	X	X	X
Quebec	X	X	X	X
Saskatchewan	No	X	X	X
Territorio Yukon	No	X	X	X
Tierra del Príncipe Eduardo	X	X	X	X

Figura 1.11. (*a*) Estados y (*b*) provincias canadienses que tienen leyes de reinspección de calderas y de recipientes de alta presión.

Ciudad o condado	Acepta informes de la compañía de seguros (X = sí)	Calderas de alta presión	Calderas de baja presión	Recipientes a presión (no calderas)
Albuquerque, N. Mex.	X	X	X	—
Buffalo, N.Y.	X	X	X	—
Chicago, Ill.	No	X	X	—
Dearborn, Mich.	X	X	X	X
Denver, Colo.	No	X	X	X
Des Moines, Iowa	X	X	X	—
Detroit, Mich.	UPV sólo	X	X	X
E. St. Louis, Mich.	No	X	X	X
Greensboro, N.C.	X	X	X	X
Kansas City, Mo.	X	X	X	X
Los Angeles, Calif.	X	X	X	X
Memphis, Tenn.	X	X	X	X
Miami, Fla.	X	X	X	X
Milwaukee, Wisc.	X	X	X	X
New Orleans, La.	X	X	X	X
New York City, N.Y.	X	X	X	—
Oklahoma City, Okla.	X	X	X	—
Omaha, Neb.	X	X	X	—
Phoenix, Ariz.	X	X	X	X
St. Louis, Mo.	X	X	X	X
San Francisco, Calif.	X	X	X	X
San José, Claif.	X	X	X	—
Seattle, Wash.	X	X	X	X
Spokane, Wash.	X	X	X	X
Tacoma, Wash.	X	X	X	X
Tampa, Fla.	X	X	X	X
Tucson, Ariz.	X	X	X	X
Tulsa, Okla.	No	X	X	X
University City, Mo.	No	X	X	—
White Plains, N.Y.	X	X	X	—
Airlington County, Va.	X	X	X	—
Dade County, Fla.	X	X	X	X
Fairax County, Va.	X	X	X	X
Jefferson Parish, La.	X	X	X	X
St. Louis County, Mo.	X	X	X	X

Figura 1.12. Ciudades o condados que tienen leyes de reinspección de calderas y de recipientes de alta presión.

Otras organizaciones de aprobación. Estas organizaciones están relacionadas con todas las clases de riesgos potenciales de incendios o seguridad eléctrica. Así sus etiquetas aparecerán sobre transportes (trasiegos) de combustible emplazados en el lugar de funcionamiento de calderas y sobre controles y cableados eléctricos. Muchas jurisdicciones y códigos contra incendios hacen referencia a estas etiquetas de cuerpos u organismos de aprobación y control legal; por otra parte, estas normativas son importantes en la instalación de calderas.

Underwriters Laboratory, UL (Laboratorio de asegurados), es una entidad activa en Estados Unidos en la aprobación de equipo eléctrico para diferentes aplicaciones de normativa establecida de seguridad y, si el producto las cumple satisfactoriamente, se le aplica la etiqueta UL.

Laboratorios Factory Mutual, FM, aprueba equipo sometido por fabricantes y también aprueba instalaciones finales, como conjuntos de combustión, si la instalación satisface sus normas y requisitos.

Aseguradores de riesgos industriales, IRI, es una organización comercial de compañías que tiene laboratorios de pruebas y también inspecciona cada instalación asegurada para su aprobación para la etiqueta IRI. Esto incluye cumplir sus normas para las instalaciones de combustión sobre calderas, pasos de gases, hogares y controles de seguridad de llama del quemador. La organización está también implicada en equipos de protección de incendios, como también FM, para «sprinklers» o rociadores y sistemas de detección y alarma de incendios.

La *Asociación Americana del Gas*, AGA, etiqueta al equipo de combustión de gases que satisface sus normas. Por ejemplo, en equipo de combustión, cuando la potencia es de más de 400.000 BTU/hora (100.000 kcal/hora) la norma exige controles de seguridad y detección de llama, incluyendo pruebas de ignición y prueba de ignición de llama principal.

Como puede verse, estos grupos de aprobación, exigen seguridad antes de aplicar su etiquetado a un equipo o sistema que puede presentar riesgo de incendio, explosión o combustión.

Certificación ISO 9000. Ésta es una serie internacional de normas de gestión de control de calidad publicadas en 1987 por la organización internacional para la normalización (ISO). Las compañías europeas han sido líderes en adoptar este sistema de gestión de control de calidad que establece un programa de control de calidad, un sistema manual y los medios o controles para establecer los requisitos. La ISO 9000 es paralela al código ASME en muchos casos para calderas y recipientes a presión y para documentación de componentes nucleares.

La Comunidad Europea dio el impulso para promover un sistema de gestión normalizado del control de la calidad, pero las compañías estadounidenses implicadas en operaciones internacionales están también empezando a considerar el registro ISO de su sistema de control de calidad porque los compradores de sus equipos o servicios están especificando el registro de la serie de ISO 9000 (certificado) como parte de los contratos. La compañía que desea estar certificada por esta normativa primero selecciona el modelo de sistema requerido, instala el modelo y prepara un manual de control de calidad que es después revisado por un auditor independiente. Éste revisa y anota si el manual de control de calidad sigue las líneas maestras de la serie ISO 9000 de normas. Véase la Tabla 1.1 de la página siguiente. El equipo auditor chequea después el sistema in situ para el establecimiento del manual de control de calidad y para el comité de gestión. El equipo auditor puede recomendar la certificación.

Como puede verse en la Tabla 1.1, una organización debe seleccionar la serie en que desea el *certificado*. Esto puede incluir su operación o trabajo total, o puede solucionarse en áreas particulares para su certificación. Los registradores reconocidos por los auditores preparan un informe de sus hallazgos para un comité equilibrado compuesto de representantes de industrias similares. El comité decide si una aplicación para acreditar una organización es aprobada y el registrador después emite un certificado de registro para el aplicante. Este certificado detalla el alcance de la actividad del programa del aplicante, al cual se aplica la serie 9000.

Tabla 1.1 Sistema de gestión del control de calidad, serie ISO 9000

ISO 9000 Listado.	Responsabilidad de gestión, principios del sistema de calidad, control y diseño de material, procedimientos de inspección prueba, adecuación del equipo de medida y pruebas, manejo, almacenaje y entrega, control documentación, control de calderas, adiestramiento, métodos estadísticos utilizados, procedimientos de auditoría internos, marketing de calidad, control de compras, control de procesos, control de producción, procedimientos de acción colectiva, control de investigación y desarrollo, servicio posventa, seguridad y garantía del producto.
ISO 9001 Actividad.	Diseño, producción, instalación y servicio de producto.
ISO 9002 Actividad.	Se aplica sólo a producción e instalación.
ISO 9003 Actividad.	Se aplica sólo a inspección formal y pruebas.
ISO 9004 Actividad.	Se aplica a la gestión de calidad y sistema de elementos necesarios para desarrollar y establecer un sistema para la actividad de calderas. Esto comprende y determina la extensión en la que a cada sistema elemental se aplica la actividad.

Reauditorías periódicas se realizan por registradores externos para confirmar que la serie ISO 9000 de requisitos esté siendo cumplida y mantenida.

En los Estados Unidos, grupos de auditores están listados por la Oficina Federal del Gobierno, el Instituto Nacional de Normas y Pruebas (N y ST) en Washington, DC, para certificar. La ISO correspondiente tiene una lista de cuerpos de certificación que suministran la calificación y ayuda estatal de los registros.

Regulaciones medioambientales. Las regulaciones estatales, federales y municipales afectan a los operadores de una planta de calderas. Los sistemas de combustión para caldera y sistemas de energía nuclear tienen que cumplir unos requisitos para su diseño y operación, de forma que el aire, agua y residuos finales de esta planta tengan efectos mínimos sobre el medio ambiente. Las reglamentaciones generales que pueden merecer revisión por los operarios de plantas de calderas incluyen el acta de aire limpio, acta de agua limpia, regulaciones concernientes a la disposición de residuos de riesgo, PCBs, depósitos de almacenaje subterráneo con líquidos o gases peligrosos y asbesto (amianto).

Las calderas que utilizan combustibles fósiles deben ser operadas para poder controlar la cantidad de dióxido de azufre y óxido de carbono emitida a la atmósfera. La monitorización contínua de emisiones de estos contaminantes se necesita ahora en las grandes calderas. La monitorización de la radiación y descarga térmica a los ríos o corrientes de agua se exige en centrales nucleares porque éstas producen más descarga térmica por unidad de potencia que las plantas de combustible fósil. Como resultado, durante el tiempo cálido, algunas centrales nucleares deben limitar su carga para evitar la violación de los límites de temperatura en las descargas térmicas impuestos por las agencias de regulación.

La polución del asbesto (amianto) y su eliminación pueden ser un problema en las salas de calderas durante cualquier actividad de reparación*. La organización OSHA** ha establecido un límite admisible de 0,1 fibras por centímetro cúbico para 8 horas de tiempo medio controlado.

Hay una larga lista de normas de seguridad OSHA que pueden afectar a las operaciones de la sala de calderas; éstas se detallan en las regulaciones OSHA 29 CFR 1910.

Los supervisores de las plantas de calderas deberían estar familiarizados con estas normas y reglamentaciones, porque ayudarán a mantener un ambiente de trabajo seguro. Por ejemplo, las normas de trabajo en espacios cerrados o confinados de la OSHA incluyen:

1. Primeras evaluaciones de temperaturas y oxígeno permitidas en espacios cerrados o confinados antes de entrar en ellos.
2. Procedimientos de suministrar ayuda de emergencia para una persona que esté en un espacio cerrado o confinado.
3. Precauciones del puesto próximo a la entrada de un espacio cerrado o confinado.

Los requisitos legales sobre equipos de calderas y plantas de energía nuclear no están ya limitados a las normas de establecimiento de una construcción segura. Han sido ampliados a los requisitos sobre controles, dispositivos para evitar explosiones del hogar y sobre medidas para limitar la polución del aire y la contaminación radiactiva. La propiedad y los operarios deben, periódicamente, revisar sus prácticas de operación y mantenimiento en orden a estar seguros de cumplir con estos requisitos legales adicionales de la jurisdicción en la que el equipo está situado.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

1. ¿Cómo definiría una caldera?

RESPUESTA: Una caldera es un recipiente cerrado a presión en el que se calienta un fluido para utilizarlo por aplicación directa del calor resultante de la combustión de una materia combustible (sólida, líquida o gaseosa) o por utilización de energía eléctrica o nuclear.

2. ¿Qué es una caldera de vapor?

RESPUESTA: Una caldera de vapor es un recipiente cerrado en el cual se genera vapor de agua o de otro fluido para uso externo por aplicación al mismo del calor resultante de la combustión de una materia combustible (sólida, líquida o gaseosa) o por el uso de electricidad o energía nuclear.

3. ¿Qué es una caldera de vapor de alta presión?

RESPUESTA: Una caldera de vapor de alta presión genera vapor a una presión de más de 15 psig (1,05 kg/cm^2) efectivos. Por debajo de esta presión se clasifica como caldera de vapor de baja presión.

---

* *N. del T.:* Del aislamiento exterior de la caldera.

** Occupational Safety and Health Administration: Administración para salud y seguridad en el trabajo.

4. Defina una caldera miniatura de alta presión.

RESPUESTA: Según la Sección I del Código ASME de Calderas y Recipientes a presión, una caldera miniatura es una caldera de alta presión que no excede los siguientes límites: 16" (406 mm) de diámetro interior de virola, 5 pies cúbicos (135 litros) de volumen exclusivo del contenedor de hierro (y aislamiento) y 100 psig (7 kg/cm^2) de presión. Si se excede cualquiera de estos límites, es una caldera de potencia (o energía). La mayoría de los estados siguen esta definición.

5. ¿Qué es una caldera de potencia (energía)?

RESPUESTA: Una caldera de potencia es una caldera de vapor que trabaja por encima de 15 psig (1,05 kg/cm^2) y que excede del tamaño de una caldera miniatura. Esto también se aplica y comprende a las calderas de calefacción y suministro de agua caliente trabajando por encima de 160 psi (11,2 kg/cm^2) o 250 °F (121 °C).

6. Defina una caldera de calefacción de agua caliente.

RESPUESTA: Una caldera de calefacción de agua caliente es una caldera usada para calefacción espacial o agua caliente, con el agua retornando a la caldera (la de calefacción que impulsa el agua a los radiadores y vuelve de éstos a la caldera). Se clasifica como de baja presión si no excede de 160 psi (11,2 kg/cm^2) o 250 °F (121 °C). Pero si excede estas cifras, pasa a ser caldera de alta presión.

7. ¿Qué es una caldera de suministro de agua caliente?

RESPUESTA: Una caldera de agua caliente suministra agua caliente sanitaria para usarse externamente para lavado, limpieza, etc. Si excede de 100 psi (11,2 kg/cm^2) o 250° F (121 °C) se convierte en caldera de potencia de alta presión.

8. ¿Qué se entiende por un caballo de potencia de caldera?

RESPUESTA: Un caballo de potencia de caldera (HP de caldera) se define como la evaporación o conversión en vapor saturado de 34,5 libras/hora de agua (15,7 kg/hora) a una temperatura de 212 F (100 °C). Así, un caballo de caldera por este método es equivalente a la potencia de 33.475 BTU/hora (8.435,7 kcalorías/hora). En el pasado se tomaron como 10 pies cuadrados (0,9 metros cuadrados) de superficie de calefacción de caldera.

9. El símbolo NB se anota a menudo en Estados Unidos en calderas con un número que le sigue. ¿Para qué se pone?

RESPUESTA: El acrónimo NB significa Asociación Nacional (USA) de Inspectores de calderas y recipientes presión. Significa que el diseño y la fabricación de la caldera fueron controlados en taller por un inspector comisionado NB, incluyendo la supervisión de la prueba hidrostática y firmando las hojas de datos requeridas por ASME.

10. ¿Qué se entiende por superficie de calefacción de una caldera?

RESPUESTA: Ésta es el área del (lado de fuego y gases) de la caldera expuesta a los productos de la combustión. Esta superficie se calcula normalmente en base a las áreas de las siguientes superficies de elementos de caldera: tubos, cajas de fuego, virolas, chapas tubulares y área proyectada de calderines. Véanse los capítulos posteriores sobre cálculos de válvulas de seguridad.

11. Defina los términos tasa IBR, tasa SBT y EDR.

RESPUESTA: El acrónimo IBR equivale a Instituto de fabricantes de calderas y radiadores, que específica y tasa la potencia de salida de calderas de fundición en potencia bruta y neta en BTU/hora (kcalorías/hora). La potencia bruta se define más adelante como la potencia neta más un exceso para pérdidas o potencia de arranque, carga, aportación de puesta a régimen (de subida de temperatura) y una pérdida térmica las tuberías.

El acrónimo SBI significa Instituto de calderas de acero. La tasa de potencia de salida de caldera SBI especifica y comprende la suma de toda potencia SBI neta en BTU/hora (kcalorías/hora) o libras/hora (kg/hora) más un 20 por 100 extra para pérdidas en tubería, no incluyendo los excesos para subida o puesta en régimen, excesos que sí tenía en cuenta la tasa IBR. La marca SBI exige el número de pies cuadrados (metros cuadrados) de superficie de calefacción para ser grabado o estampado sobre la caldera (o placa oficial de la caldera).

El acrónimo EDR significa Radiación Directa Equivalente. Se refiere estrictamente a la superficie equivalente de radiación en pies cuadrados (metros cuadrados). Se define además como la superficie que emite 240 BTU/hora (360,5 kcal/hora) con una temperatura de vapor de 215 °F (101,6 °C) a una temperatura ambiente de 70 °F (21 °C). Con calefacción por agua caliente se usa el valor de 150 BTU/hora (37,8 kcal/hora) con una caída de temperatura de 20 °F (7 °C) entre entrada y retorno del agua. Este término se utiliza por arquitectos e ingenieros de calefacción al determinar el área de transferencia térmica del equipo de calefacción requerido para calentar un espacio.

12. Cite tres términos utilizados para indicar potencia de caldera.

RESPUESTA: Estos tres términos se utilizan a menudo con los listados de presión y temperatura:

1. Para calderas de vapor, la evaporación real en libras/hora (kg/hora). Para calderas de agua caliente, los BTU/hora (kcal/hora) de potencia para la presión y temperatura dadas, que están grabadas sobre la caldera. Hoy en día éste es el método más utilizado.
2. Pies cuadrados (metros cuadrados) de superficie calefactora.
3. HP de caldera.

13. ¿Qué es una caldera súper crítica de circulación abierta?

RESPUESTA: Es una caldera que trabaja por encima de la presión crítica de 3.206,2 psia (224,4 kg/cm^2) y 705,4 °F (374,1 °C) de temperatura de saturación y que no tiene recirculación de fluido cuando trabaja a plena presión y temperatura. El fluido se lleva a presión y temperatura por los pasos de fluido conectados en serie; de ahí el término aplicado.

14. ¿Por encima de qué presión y temperatura se convierte un sistema de caldera de agua caliente en sistema de caldera de agua caliente a alta temperatura?

RESPUESTA: Una caldera de agua caliente se convierte en sistema de caldera de agua caliente a alta temperatura (HTHW) cuando la temperatura del agua sobrepasa los 250 °F (121,1 °C) y la presión está por encima de 160 psi (11,2 kg/cm^2).

15. ¿Cuál es la razón principal para usar fluidos térmicos como el dowtherm y el glicol en procesos térmicos?

RESPUESTA: Los fluidos térmicos se usan para obtener temperaturas elevadas a bajas presiones, lo que puede ser difícil de obtener con un equipo de caldera ordinaria de vapor. Nótese que se necesita una presión de 3.602,2 psia (252 kg/cm^2 absolutos) para obtener un vapor a temperatura de saturación de 705,4 F (374 °C). Esta temperatura puede obtenerse con algunos fluidos térmicos a presiones inferiores a 50 psi (3,5 kg/cm^2).

16. Cite tres dispositivos limitadores de presión necesarios en una caldera de calefacción por vapor según los requisitos de código ASME.

RESPUESTA: Los tres dispositivos limitadores de presión son:

1. Un dispositivo de corte operado por presión que corta automáticamente el suministro de combustible cuando se alcanza la presión deseada.
2. Un dispositivo de control de límite superior de presión ajustado a no más de 15 psi (1,05 kg/cm^2), que automáticamente corta el suministro combustible cuando se alcanza la presión superior.
3. Al menos una válvula de seguridad cargada a resorte tipo alivio, ajustada y precintada para descargar una presión no mayor que la máxima presión admisible de trabajo de la caldera y con una capacidad suficiente para que la presión en la caldera no pueda exceder de 5 psi (0,39 kg/cm^2) por encima de la presión máxima permisible grabada en la caldera.

17. ¿Cuál es el objeto del control del nivel de agua en una caldera de vapor?

RESPUESTA: Mantener el nivel adecuado de agua en la caldera por el control de arranque/parada de la bomba de alimentación de agua a caldera cuando hay demanda de agua mediante el dispositivo de control de límite inferior de nivel de agua, y cortar o cerrar la bomba cuando el nivel de agua del límite superior se alcanza.

18. ¿Qué habría que hacer si al arrancar la caldera se nota que el nivel de agua está rebasado, es decir, por encima del vidrio visible del nivel de agua?

RESPUESTA: Debería cortarse la caldera y drenarse hasta el nivel adecuado. Si el nivel no baja, es una indicación de 1) pérdidas en tubos o 2) mal funcionamiento del controlador de nivel, y la caldera debería ponerse en seguridad hasta que puedan efectuarse las reparaciones necesarias.

19. ¿Cuál es el propósito del corte de combustible por bajo nivel de agua?

RESPUESTA: Cortar el aporte de combustible al quemador antes de que el agua de la caldera rebase el nivel de seguridad admisible, y así evitar daños por recalentamiento de la caldera.

20. Si el nivel de agua cayera por debajo de la parte inferior visible del vidrio y el quemador no corta, ¿qué pasos deben seguirse?

RESPUESTA: Cortar la válvula de llegada de combustible al quemador y cortar la electricidad a la caldera, suponiendo que es una pequeña caldera de vapor automática. Dejar que la caldera se enfríe y entonces comprobar los controles para determinar por qué el controlador de nivel y el corte de combustible por bajo nivel de agua no funcionan como se ha diseñado.

21. ¿Con qué frecuencia debería comprobarse el corte de combustible por bajo nivel de agua en las calderas automáticas?

RESPUESTA: Al menos una vez al día y cada turno, si existe más de un turno de trabajo.

22. ¿Por qué debería la columna de agua del corte de combustible por bajo nivel ser lavada y purgada diariamente drenando los dispositivos respectivos?

RESPUESTA: Esto debería mantener la columna de agua y las cámaras de corte de combustible por bajo nivel de agua libres de sedimentos y suciedad, permitiendo así al corte de combustible por bajo nivel operar cuando se necesite.

23. ¿Por qué deberían mantenerse las aberturas de aire en la sala de calderas limpias y libres de toda obstrucción que pueda estropear o impedir el flujo de aire a la sala?

RESPUESTA: Ambas condiciones pueden producir una falta de aire o dificultad de su flujo a la sala de calderas y esto produciría una posible combustión incompleta en la caldera. Esto puede crear problemas con la relación aire/combustible, con el control del quemador y también crear un posible riesgo a la salud por la formación de monóxido de carbono de la combustión incompleta.

24. ¿Cuál es la potencia o producción de una caldera en libras (kg) por hora y BTU (kcal) por hora de una caldera tarada a 750 HP?

RESPUESTA:

Producción: 34,5 × 750 HP = 25.875 lbs/hora; 15,7 × 750 = 11.775 kg/hora, o bien:
Producción: 33.475 BTU/h × 750 HP = 25.106.250 BTU/h;
8475,7 kcal/h/HP × 750 = 6.326.775 kcal/h

25. Calcular el rendimiento de caldera, utilizando el vapor generado *versus* el combustible consumido. Usted tendrá como datos que para un mes de calendario de trabajo regular el carbón consumido es de 682.000 libras (309.628 kilos) y el vapor generado es de 6,4 millones de libras (2,9056 millones de kilos) a 179 psig (12,53 kg/cm^2) y sobre calentado a una temperatura total de 520 °F (271,1 °C). Suponga que el poder calorífico del carbón quemado es de 13.260 BTU/libra (7.360,2 kcal/kg) y que la temperatura del agua de alimentación es de 208 °F (97,8 °C).

RESPUESTA: Primero la evaporación real por libra de carbón quemado (o kg) es de:

$$\frac{6.400.000 \text{ lbs vapor}}{682.000 \text{ lbs carbón}} = 9{,}384 \text{ lb vapor/lb carbón} = 9{,}38 \text{ kg vapor/kg carbón}$$

Las tablas de vapor muestran que el calor total o entalpía de 1 libra de vapor a 194 psia (13,58 kg/cm^2) es de 1.280,4 BTU/libra, o sea: 710,7 kcal/kg de vapor. Con el agua de alimentación a la temperatura de 208 °F (97,8 °C) su contenido de calor será de (por encima de 32 °F): 208 – 32 = 176 BTU/lb, o bien 97,7 kcal/kg. Así pues, el calor puesto en cada libra de vapor producido por la caldera será de:

1.280,4 BTU/lb – 176 BTU/lb = 1.104,4 BTU/lb, o bien:
710,7 kcal/kg – 97,7 kcal/kg = 613 kcal/kg.

El calor dado a las 9,38 lbs vapor/kg carbón valdrá:

1.104,4 BTU/lb × 9,40 lbs/lb carbón = 10.381,4 BTU/lb carbón, o bien:

613 kcal/kg × 9,38 kg/kg carbón = 5.762,2 kcal/kg de carbón. Así pues, la eficiencia o rendimiento será de:

10.381,4/13.260 = 78,3 %, o bien: 5.762,2/7.360,2 = 0,783 = 78,3 %.

26. (*a*) El agua de alimentación a 300 °F se convierte en vapor sobrecalentado a 800 psia (56 kg/cm^2 absolutos) y 900 °F (482,2 °C). ¿Cuántas BTU (o kcal) se necesitan para ello?

(*b*) Si ésta fuera una caldera quemando carbón de 13.600 BTU/libra (7.548,9 kcal/kg carbón) de poder calorífico y con una evaporación de 9,4 libras de agua por libra de carbón, determine la eficiencia de caldera usando el método de entrada-salida energética.

RESPUESTA:

(*a*) De la tabla de vapor sobrecalentado (Tabla 3, en la Fig. 1.5), la entalpía a 800 psia (56 atm) y 900 °F (482,2 °C) es de 1.455,4 BTU/lb (807,8 kcal/kg). De la Tabla 1, el líquido saturado a 300 °F (148,9 °C) tiene 269,6 BTU/lb (149,6 kcal/kg). El calor necesario para convertir al líquido en vapor sobrecalentado es:

(1.455,4 − 269,6) BTU/lb = 1.185,8 BTU/lb = 658,2 kcal/kg.

(*b*) Producción de salida = 9,4 lbs H_2O × 1.185,8 BTU/lb H_2O = 1.1146,5 BTU/kg; el rendimiento será n = 11.146,5/13.600 = 0,8196 = 81,96 %
658,2 × 9,4 = 6.187 kcal/kg.

27. ¿Por qué una caldera no se drena o descarga mientras el hogar y pasos de humos están calientes?

RESPUESTA: Esto es necesario para evitar el recocido de los lodos sobre los tubos y otras superficies calefactoras y también para evitar las elevadas tensiones térmicas que se desarrollan por un enfriamiento demasiado rápido. Esto evitará fugas por las empaquetaduras de las juntas y extremos de los tubos y zonas similares afectadas por la dilatación y la contracción.

28. ¿Qué es un manómetro compuesto?

RESPUESTA: Un manómetro compuesto es un indicador de presión que señala presión en una mitad del dial, mientras que la otra mitad señala vacío. Se utiliza allí donde el sistema de calefacción puede variar de las condiciones de presión a las de vacío.

29. ¿Cuáles son los ventajas de convertir los controles e instrumentación de una caldera de tecnología analógica a digital?

RESPUESTA: La instrumentación y los controles basados en tecnología digital permiten un ajuste más fino de las variables de entrada y salida de caldera. Se alcanza un control más exacto de la eficiencia térmica al aproximar los puntos de consigna a los límites operativos de diseño. Se consigue una mejora de las emisiones por un control más preciso de los procesos de combustión tales como las relaciones aire/combustible y también de cualquier equipo de limpieza de proceso aguas abajo, si así está instalado, como en las plantas que queman carbón. Se requiere menos personal para manejar la planta porque la sala de control centralizado proporciona una pantalla de vídeo de las condiciones operativas para cada bucle del sistema de caldera. Señalización adecuada y alarmas, así como otros dispositivos pueden incorporarse al sistema de control, normalmente empleando tecnología informática adecuada.

30. ¿Cuáles son las posibilidades de diagnóstico incorporadas en los controles de caldera modernos?

RESPUESTA: Cualquier fabricante de calderas de capacidad moderada suministra muchos esquemas, como los de: funciones de entrada y salida de caldera en pantalla de vídeo con los que el operador puede comprobar cualquier variable a partir de los puntos de consigna por medio de un teclado de ordenador o de interface clave tipo «ratón»; asimismo, puede controlar el arranque u otro problema de funcionamiento mostrado en la pantalla de vídeo con explicación lógica y cómo poder solucionarlo. Situaciones típicas mostrados en las pantallas son: nivel de agua demasiado bajo, ventilador parado, presión de gas demasiado baja, caudales de aire para mostrar el aire requerido para el combustible que está siendo quemado. La pantalla de diagnóstico permite al operador corregir el problema en vez de iniciar una investigación para conocer las causas.

31. Diferencia entre ISO 9000, 9001, 9002, 9003 y 9004.

RESPUESTA: Las normas combinadas están diseñadas para establecer un sistema de gestión del control de calidad. Las normas ISO 9000 y 9004 definen los términos y proporcionan los elementos del sistema necesarios para cumplir la norma aplicable, mientras la 9001, 9002 y 9003 presentan los diversos modelos de actividades del sistema. La ISO 9001 especifica el aseguramientos de calidad en diseño, producción, instalación y servicio de un producto determinado. La ISO 9002 se aplica sólo a producción e instalación. La ISO 9003 se aplica a la inspección final y a las pruebas. Véase la Tabla 1.1 para más detalles sobre la serie ISO 9000 de normas.

32. Describa brevemente los requisitos del código ASME en la sección primera (calderas de potencia) para un programa de control para fabricación de calderas según la normativa.

RESPUESTA: El programa de control de calidad requerido al fabricante incluye:

1. Soporte de gestión nombrando un gerente de control de calidad para instalar el programa.
2. Una carta de organización mostrando cómo se aplica el control de calidad al diseño, selección de materiales, inspección, registro de documentación y las hojas de comprobación que se van a aplicar a cada etapa del ciclo de fabricación.
3. Provisiones para corregir defectos según reglas normalizadas.
4. Comprobación periódica de controles, equipo de pruebas NDT e instrumentos similares.
5. Planteamiento de formularios y datos de una marcha registrada del control de calidad para referencia futura.
6. Mantenimiento de registros de soldadores y procedimientos de soldadura y pruebas de calificación, así como registros de NDT y de tratamientos térmicos llevados a cabo.

33. ¿Qué sello o estampa se precisa en un montaje de caldera en campo cuando se hace el ensamblaje por un contratista y no por el fabricante de la caldera?

RESPUESTA: El contratista debe estar calificado por ASME para grabar la caldera con un sello «A».

34. ¿Por qué se arriostran las superficies planas por encima de una cierta área o zona de arriostramiento o refuerzo en una caldera?

RESPUESTA: La acción de la presión sobre superficies planas que no son de espesor suficiente abombaría la chapa en forma esférica y posiblemente produciría una rotura. Los refuerzos o riostras sujetan las superficies planas y soportan el esfuerzo de la presión evitando el abombamiento de la superficie plana de chapa.

35. ¿Por qué deberían repararse las fugas de vapor en un sistema de caldera tan pronto como sea posible?

RESPUESTA: Todas las fugas deberían repararse inmediatamente para evitar roturas mayores y también para evitar daños físicos a las personas. La pérdida de vapor por las fugas es también energía que se pierde, lo que aumenta los costes de combustible de la planta.

36. ¿Qué riesgo puede crearse al abrir rápidamente una válvula de vapor?

RESPUESTA: El repentino cambio de presión puede producir el golpe de ariete, vibraciones e incluso rotura de tuberías por el cambio repentino de presión en zonas de transición como, por ejemplo, codos.

37. ¿Cuáles son las agencias de inspección autorizadas reconocidas por el código ASME de calderas?

RESPUESTA: El código designa como agencias de inspección autorizadas a aquellas organizaciones o agencias de inspección que empleen inspectores calificados mediante examen escrito bajo las normas de una jurisdicción (o autoridad) que puede ser estatal o de los municipios de los Estados Unidos o provincias de Canadá que han adoptado una o más secciones del código de calderas o de una compañía aseguradora autorizada para suscribir contratos de seguros de calderas y recipientes a presión en todas jurisdicciones respectivas.

38. ¿Qué adiestramiento adicional debe conseguir un inspector comisionado NB para merecer el endoso «A» para realizar inspecciones en taller de fabricantes según normativa NB?

RESPUESTA: El endoso «A» exige una realización con éxito de treinta horas de adiestramiento y de formación, además del comisionado NB, y un adicional de ochenta horas de adiestramiento supervisado en la materia y en el taller del fabricante.

39. ¿Qué requisitos de experiencia debe tener un individuo empleado regularmente por una agencia de inspección autorizada antes de serle permitido pasar el examen de dos días para un certificado de competencia NB como inspector comisionado de calderas y recipientes a presión?

RESPUESTA: Los requisitos actuales son: experiencia práctica en diseño, construcción, mantenimiento, operación o inspección de calderas de alta presión y recipientes a presión, y que debe constar de lo siguiente:

1. Grado ME*, más un año de experiencia práctica.
2. Otros grados de ingeniería más dos años de experiencia práctica.

---

* Ingeniería Mecánica.

3. Al menos una formación universitaria más 3 años de experiencia práctica.

Los candidatos deben también estudiar las siguientes secciones del código ASME: sección I: calderas de potencia; sección IV: calderas de calefacción; sección IX: cualificación de soldadura; sección V: examen de ensayos no destructivos, y el código de inspección del NB.

40. ¿Qué caldera de potencia se clasifica como caldera miniatura?

RESPUESTA: Una caldera de alta presión que no exceda ninguna de las siguientes medidas: diámetro interior de virola: 16″ (406 mm); superficie de calefacción: 20 pies cuadrados (1,8 metros cuadrados); volumen de cámara a presión: 5 pies cúbicos (0,135 metros cúbicos); presión admisible de trabajo: 100 psig (7 atmósferas).

41. ¿Cuál es utilizada por el código ASME de calderas como presión máxima admisible: la presión manométrica o la presión absoluta?

RESPUESTA: El código ASME se refiere a la presión manométrica o presión por encima de la atmosférica en psi (o kg/cm^2), porque es la que se lee por el operario o usuario de la caldera (presión relativa).

42. ¿Cómo se convierte una sección del código ASME de calderas en requisito legal para una jurisdicción?

RESPUESTA: Normalmente un cuerpo legislativo de una jurisdicción establece aplicabilidad por mandato de la normativa del código en base a una sección, como la sección I, IV y VIII, o incluso partes de ellas, y esto se convierte en requisito legal para un lugar dentro de la jurisdicción. La maquinaria legal jurisdiccional refuerza y se pueden adoptar condiciones o exclusiones al código ASME por parte de todas jurisdicciones, tales como certificados estatales de derecho a funcionamiento y derechos estatales de inspección (con sus gravámenes económicos), que no están cubiertos por el código ASME.

Capítulo 2

CALDERAS DE TUBOS DE HUMOS

La caldera de tubos de humos o pirotubular (de tubos de fuego) es la caldera que más prevalece y se utiliza para aplicaciones de calentamiento de procesos y aplicaciones industriales y comerciales. Las calderas antiguas requerían grandes refuerzos. Las configuraciones de caldera están influidas por las necesidades de transferencia térmica de modo que se puede extraer del combustible y del material la mayor parte del calor que las condiciones económicas permitan. El efecto de la forma es de inmensa importancia para las tensiones y requerimientos de esfuerzo de una caldera. Es bien conocida la ley científica de que la presión de un fluido se transmite con igual intensidad en todas las direcciones. Siguiendo esta ley, un recipiente de forma irregular sujeto a presión interna siempre tiende en sus esfuerzos y distribución de los mismos hacia una forma esférica perfecta. La primera tendencia de un depósito o recipiente de forma oval sería a cambiar su sección transversal elíptica hacia un verdadero círculo.

Con relación a estos hechos, uno puede pensar en un fondo plano de un recipiente trabajando a muy poca presión interna y ver qué tipo de refuerzo se ha de utilizar. Sin embargo, si se utiliza un fondo esférico o abombado, el refuerzo puede disminuirse o contrarrestarse con dicha disposición. Los fondos de calderines de calderas de alta presión son siempre prácticamente curvos o abombados en forma elíptica. No se precisan refuerzos adicionales para estos fondos o cabezales de calderín.

La mayoría de las calderas pirotubulares tienen superficies planas que requieren arriostramientos consistentes en tirantes transversales o diagonales, porque la placa plana tendría que tener un gran espesor para resistir la presión de trabajo impuesta. Los hogares interiores como los de las calderas SM (Scotch Marine, marina escocesa) trabajan a compresión y la tensión flectora causada por la presión dentro de la caldera actúa sobre la circunferencia exterior y cilindro longitudinal, que es el hogar de la caldera. Esta fuerza tiende a aplastar el hogar, y la chapa del hogar para no ser de espesor excesivo necesita ser atirantada* o arriostrada. Esta chapa del hogar interior suele adoptar forma ondulada o con anillos de refuerzos colocados a lo largo del hogar tubular.

* Con tirantes y/o virotillos.

Los cálculos de los componentes de las calderas pirotubulares están detallados en el capítulo sobre Normativa de Tensiones y Cálculos de Esfuerzos.

Tipos y disposición. Las calderas pirotubulares se clasifican en tubulares horizontales (HRT) (de retorno horizontal), económicas o de tipo de cajas de humos, de caja de fuego tipo locomotora, tipo marina escocesa, tubular vertical y caldera vertical sin tubos. La caldera horizontal HRT ahora representa sólo alrededor del 5 por 100 de las calderas en servicio del total de las del tipo de tubos de humos que están operativas. El diseño de la marina escocesa (véase la Figura 2.1) de hogar interior es el tipo pirotubular dominante para ambos tipos de procesos, industriales y de calefacción, hasta alrededor de 22,5 toneladas/hora de capacidad. Por encima de esta capacidad de producción generalmente se utilizan las calderas de tubos de agua.

Detalles generales constructivos. La caldera pirotubular tiene los finales de los tubos expuestos a los productos de la combustión y tiene otras superficies planas que requieren arriostramientos con acero estructural para evitar un espesor de chapa excesivo. Los tubos en todas las calderas pirotubulares deben ser laminados y mandrilados (achaflanado) (Fig. 2.2) o laminados y soldados. Si son laminados y solda-

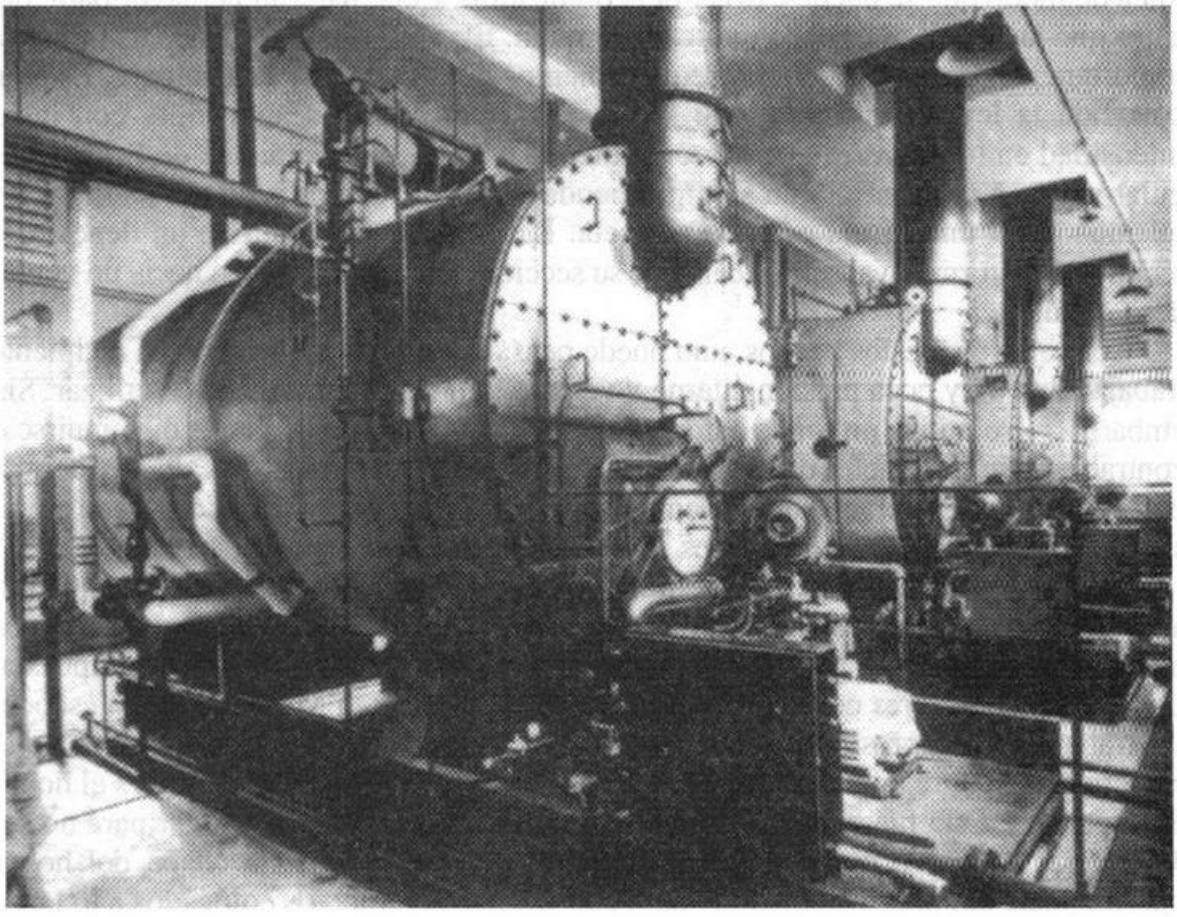


Figura 2.1. Cuatro calderas compactas SM de 400 HP (6,25 Tns/hora) equipadas para quemar combustible petrolífero líquido o gaseoso suministran vapor para calefacción y proceso en una instalación militar. (*Cortesía de Cleaver-Brooks Co.*)

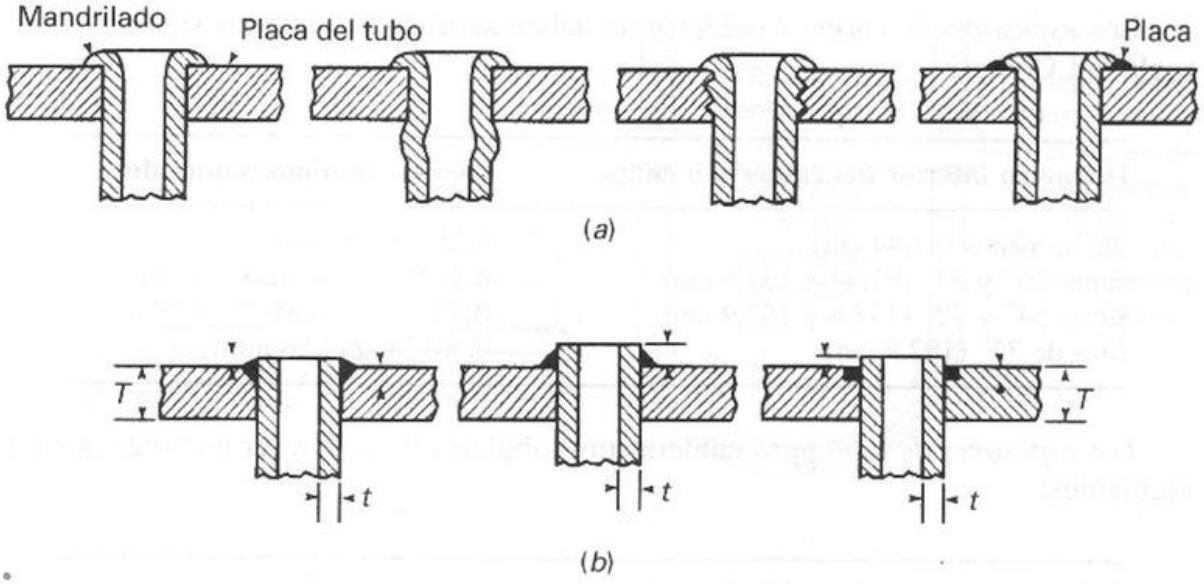


Figura 2.2. Fijaciones de los tubos de humos permitidas por el Código. (*a*) Tubos laminados y mandrilados en calderas pirotubulares. (*b*) Tubos laminados y soldados en calderas pirotubulares. Véase el Código para dimensiones de soldadura y sobre dimensionado del tubo y alojamiento en placa.

dos, en calderas de alta presión, véanse los detalles de soldadura en la sección primera del código ASME de calderas de potencia (Power Boilers). Los tubos son mandrilados o achaflanados en sus bordes extremos para evitar que los finales de tubo sean quemados por los gases calientes en esta zona. El mandrilado también incrementa la transferencia de calor cerca de la chapa final del tubo y la unión de éste. Las pestañas o rebordes del extremo del tubo son achaflanadas en aproximadamente 1/16″ (1,6 mm) sobre el diámetro de los taladros de forma que no haya rasgaduras o cortes en el tubo cuando se expansiona. Los alojamientos de los tubos de humos están mecanizados con una holgura de 1/16″ (1,6 mm) en diámetro sobre el diámetro exterior del tubo, de modo que se permita al tubo con su cascarilla introducirse sobre la placa sin dañar el taladro de ésta.

Los tubos de humos están normalmente sometidos a presión exterior, así que pueden comprimirse o aplastarse pero no reventar o estallar de dentro hacia afuera. Los mayores problemas son la pérdida de tubos en la placa; grietas, quemaduras y corrosión de los extremos del tubo; picado exterior por el agua y corrosión que produce fugas; y corrosión por el interior (lado humos), así como picaduras que provocan fugas o arranques en la chapa del tubo (como consecuencia de un laminado deficiente). También las capas de depósitos en el revestimiento del lado de agua que producen sobrecalentamiento y posible pandeo y/o pérdida de material de la chapa del tubo.

El cilindrado o barrilete de los recipientes o chapas de colectores debe hacerlos circulares y estar dentro del límite del 1 por 100 del diámetro medio. Esto también se aplica a los calderines de las calderas de tubos de agua. Durante las inspecciones de reconocimiento de daños de calderines o chapas de calderas por sobrecalentamiento, estos requisitos del Código pueden usarse como guía para comprobar si la caldera aún cumple estos requisitos de circularidad (o límite de redondez).

Los *espesores de chapa y calderín* no deben ser menores que los siguientes por regla del Código:

Diámetro interior del calderín o chapa	Espesor mínimo requerido
36″ o menos (91,44 cm)	0,25″ (6,35 mm)
Entre 36″ y 54″ (91,44 y 137,6 cm)	0,3125″ (7,94 mm)
Entre 54″ y 72″ (137,6 y 182,9 cm)	0,50″ (12,7 mm)
Más de 72″ (182,9 cm)	0,56125″ (14,26 mm)

Los espesores de tubo para calderas pirotubulares no deben ser menores que los siguientes:

Diámetro interior del calderín o chapa	Espesor mínimo requerido
42″ o menos (106,7 cm)	0,375″ (9,53 mm)
De 42″ a 54″ (106,7 a 137,6 cm)	0,4375″ (11,11 mm)
De 54″ a 72″ (137,6 a 182,9 cm)	0,50″ (12,7 mm)
Más de 72″ (182,9 cm)	0,56125″ (14,26 mm)

Las superficies planas son arriostradas bien con tornillos o tirantes. Los tornillos (o virotillos) pueden ser roscados, soldados y huecos. Se utilizan generalmente para arriostrar pequeñas separaciones o luces, como las chapas interior y exterior de los pasos de agua.

Véanse las Figuras 2.3*a* y *b*. Los finales de los virotillos o tirantes roscados atraviesan la chapa y se extienden más allá de ésta no menos de dos roscas cuando se instalan, después de lo cual los finales deben roblonarse o remacharse sobre ella sin daño excesivo de la chapa. Pueden también fijarse con tuercas roscadas, supuesto que los virotillos o tornillos se extienden y pasan a través de la tuerca.

Si los tirantes o virotillos son macizos, de 8″ (203,2 mm) de longitud o menores y roscados, pueden estar taladrados con orificios de seguridad* (Fig. 2.3*a*) al menos de 3/16″ (4,763 mm) de diámetro y una profundidad que se prolongue al menos 1/2″ (12,7 mm) más allá del grosor de la chapa. Si el tornillo o tirante está reducido de diámetro entre sus extremos, el orificio de seguridad debe extenderse 1/2″ (12,7 mm) más allá del punto donde empieza la disminución de diámetro. Para los tornillos de más de 8″ (203,2 mm) de longitud los orificios chivatos no se precisan, ni incluso si el tornillo o tirante está fijado por soldadura y se han seguido las normas del código. Véase la Figura 2.3. Como los tornillos o tirantes normalmente se rompen cerca de la chapa soportada, debe prestarse atención al escape de agua proviniente del orificio de seguridad o «chivato».

Los tornillos, tirantes y virotillos deben estar colocados en taladros perforados a través de la chapa, excepto para los diagonales, que pueden soldarse por un extremo a la chapa, pero no por la cabeza, y supuesto que la soldadura no es menor de 3/8″

* O chivatos.

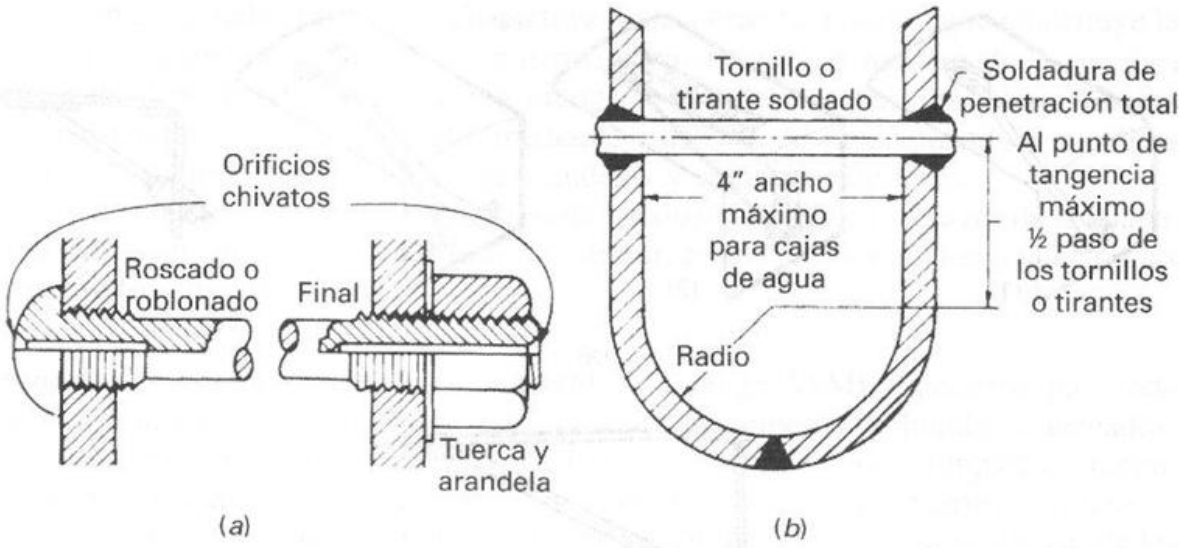


Figura 2.3. Tirantes o tornillos permitidos por Código. (*a*) Los tornillos roscados deben tener orificios que muestren si existen grietas en el interior del tirante o tornillo. (*b*) Detalles de los tirantes o tornillos soldados. Estos tipos de tirantes o tornillos no precisan orificios chivatos.

(9,53 mm) y que el filete de soldadura continua a lo largo del tirante. Los tornillos insertados por soldadura no pueden proyectarse más de 3/8″ (9,5 mm) más allá de la chapa expuesta a los productos de combustión. La soldadura debe descargarse de tensiones después de realizada. No se requiere radiografía (rayos X).

Atirantado (arriostrado) de chapas con virotillos o tirantes. En calderas pirotubulares el segmento de chapa por encima de la parte superior de los tubos requiere arriostramiento. Para esto hay tres sistemas o métodos normales. En una caldera que no exceda de las 36″ (914,4 mm) de diámetro o 100 psi (7 kg/cm^2) de presión de trabajo, las formas estructurales, como angulares o «UES» de acero, pueden soldarse al segmento (en los extremos del mismo). Los pasos exteriores están proporcionados para tener resistencia suficiente a la flexión para soportar la carga debida a la presión (es decir, los que constituyen el cilindro en sí).

Para calderas que excedan de las 36″ (914,4 mm) de diámetro o 100 psi (7 kg/cm^2) de presión de trabajo, el segmento o zona plana de la chapa (circular exterior diámetro de calderas) requiere arriostramiento bien por tirantes diagonales entre las chapas tubulares (o «cáscara» de caldera) o mediante arriostramientos a lo largo de todo el cilindro-caldera. Esta última es preferible, porque deja más espacio interior libre de caldera para limpieza e inspección. Los tirantes o traviesas transversales pueden hacer muy difícil para un trabajador o inspector moverse alrededor de los tubos de caldera.

Las calderas viejas tienen arriostramientos diagonales roblonados a la chapa y «cáscara» (o chapa tubo caldera) como se ve en la Figura 2.4*a* de la página siguiente. Las calderas modernas no usan riostras soldadas como se ve en la Figura 2.4*b*. Las riostras viejas tienen denominaciones como Huston, MacGregor y Scully, como se ve en la Figura 2.4*a*. Las riostras diagonales están colocadas para trabajar en tensión abrochalando un extremo y después calentando la riostra antes de fijarla por el otro extremo. Una vez enfriada, la riostra está tensionada.

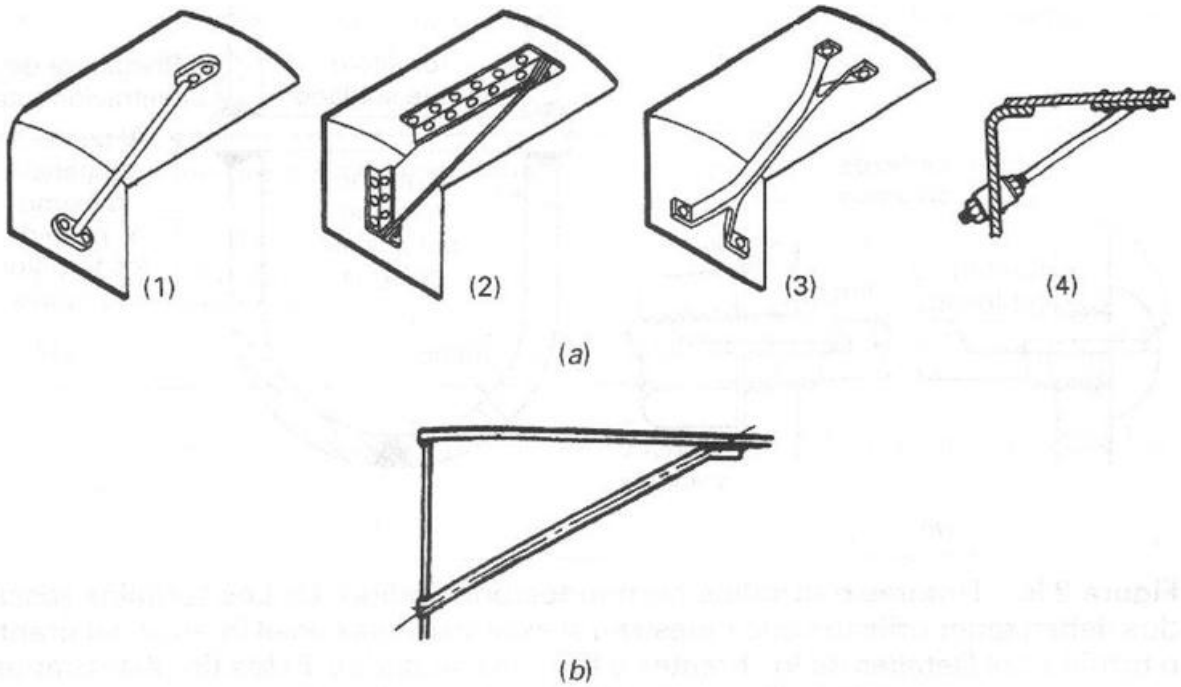


Figura 2.4. Arriostramientos o contrafuertes (riostras) usadas en calderas de tubos de humos. (*a*) Riostras remachadas en viejas calderas: 1) tirantillo o virotillo; 2) cartela remachada; 3) pie en *x*; 4) tirantillo roscado-soldado. (*b*) La riostra o tiranta en las calderas modernas requiere soldaduras de plena penetración en la chapa y plena soldadura penetrante en el pie.

La soldadura de las riostras diagonales debe cumplir las normas del Código. Entre los requisitos exigidos están:

1. Los puntos de soldadura tendrán un tamaño no menor de 1/8″ (3,2 mm) y deben estar realizados por todo el perímetro alrededor de la riostra en contacto con la chapa.
2. No se permiten las soldaduras punteadas en toda chapa para las riostras diagonales. Como la Figura 2.4*b* muestra, se requiere penetración plena y soldadura continua.
3. Todas las soldaduras de riostras requieren tratamiento térmico posterior de eliminación de tensiones según el Código.

El sobrecalentamiento de las chapas de caldera normalmente producirá algún efecto sobre las riostras diagonales. Se verá que habrán combado o perdido su tensión residual. Las riostras diagonales estarán colocadas en posición antes de que los tubos se monten en la caldera. En orden a evitar la distorsión de la cabeza a través de la tensión de las riostras se colocan una o más barras de acero contra la chapa del cilindro a modo de viga, estando así la chapa soportada contra la tensión de las riostras hasta que algunos de los tubos están instalados. Esta viga se denomina contrafuerte.

El arriostrado de la sección de chapa tubular por debajo de los tubos de la caldera HRT* y similares se ve afectado normalmente por las riostras frontales. Estas rios-

* De tubos de humos de retorno horizontal.

tras están conectadas fuera de la chapa trasera de cierre del cilindro que constituye la caldera. Los trozos finales de las riostras, normalmente en número de 2, pasan a través del frontal de la caldera con tuercas y arandelas exteriores. Normalmente están estanquizadas contra fugas mediante estrobos de empaquetadura metálica blanda de varios tipos debajo de las arandelas y carcasas exteriores.

La razón por la que las zonas finales de las riostras no pasan a través de la chapa, sino que están conectadas fuera desde el interior, es que el calor del fuego dañaría las tuercas y los finales roscados.

Agujeros de hombre y de servicio manual. El código ASME especifica que «toda caldera o pieza relacionada debe estar provista de agujeros de hombre adecuados, agujeros de mano, u otras aberturas de inspección para examen o limpieza, excepto los tipos especiales de caldera donde tales aberturas no son necesarias o útiles».

Un orificio o entrada de hombre se necesita en la parte superior o cabezal de las calderas pirotubulares de más de un metro de diámetro. Una abertura manual debajo de los tubos bastará para las calderas más pequeñas.

Si la caldera es de 48″ (1.219 mm) de diámetro o mayor, se necesita un agujero de hombre en el cabezal frontal por debajo de los tubos. Se necesitará un agujero de hombre o de mano en esta posición en las calderas pequeñas. Cuando se utiliza el agujero de hombre en el cabezal frontal bajo los tubos, es preferible suministrar también un agujero manual en el cabezal trasero bajo los tubos, ya sea requerido por el código local o no. La eliminación de este agujero de mano trasero puede producir dificultades considerables para limpiar las superficies interiores más bajas de la caldera.

Nivel de agua. Los tipos de calderas de tubos de humos deben construirse para que la lectura más baja en el nivel de cristal esté al menos 3″ (76,2 mm) por encima del punto más alto de los tubos de humos. Las calderas de tipo locomotora de 36″ (914 mm) o menos de diámetro requieren al menos 2″ (50,8 mm) por encima de los tubos, pero si tienen más de 36″ (914 mm) de diámetro, precisan también 3″ (76,2 mm) de nivel de agua por encima de los tubos.

Superficies calefactoras. En todas las calderas, las superficies de calefacción se miden en el lado que reciben el calor. Para las calderas pirotubulares, esto incluye una superficie de proyecto de tubos (diámetro × longitud) y una superficie extra en la zona del hogar. Al computar las superficies calefactoras, sume las áreas de tubos, cajas de humos, chapa tubular u hogar y las zonas proyectadas de los cabezales expuestos a los productos de la combustión. Hay una excepción para las calderas verticales de tubos de humos que, por normativa del Código, requieren que sólo las superficies tubulares hasta la mitad del nivel de agua sean utilizadas al calcular su contribución a la superficie de calefacción.

El Código requería, antes de los cambios introducidos en 1995, de todo fabricante de calderas enteras, marcar con punzón la superficie de calefacción, excepto para las calderas eléctricas, donde se requiere la potencia eléctrica en kW. El estampillado requiere ahora que se debe señalar la máxima producción o capacidad de vapor en kg por hora para el combustible de diseño.

Tasas térmicas (calor desprendido). Las tasas de desprendimiento térmico elevadas en las calderas de hogar interior SM han provocado problemas en el hogar de las calderas y en la chapa tubular en el pasado. Esto fue debido a la competición entablada por unos fabricantes para suministrar una caldera de mayor capacidad a menor coste. Se utilizan dos tasas térmicas:

1. *Volumétrica* es la tasa térmica por unidad de volumen de hogar, y es la relación:

$$\frac{\text{Máximo caudal de combustible} \times \text{poder calorífico superior del combustible}}{\text{m}^3 \text{ de volumen del hogar}}$$

   Valores guía recomendados:

   Para combustibles líquidos: 35 MBTU/ft^3; máximo 45 MBTU/ft^3; o en unidades europeas: 326.667 kcalorías/m^3; máximo 420.000 kcalorías/m^3.

2. *Superficial (superficie radiante efectiva proyectada)* es la relación:

$$\frac{\text{Tasa térmica de combustible}}{\text{m}^2 \text{ de superficie radiante del hogar}}$$

   Valores guía recomendados (nótese que algunas jurisdicciones tienen límites para esta relación):

   Para combustibles líquidos: 180.000 BTU/ft^2 (504.000 kcal/m^2).
   Para combustibles gaseosos: 200.000 BTU/ft^2 (560.000 kcal/m^2).

Los cálculos para estas líneas maestras de guía están hechos tomando la tasa térmica del combustible y dividiendo por el área del hogar normal al eje de la llama. Debe evitarse la incidencia directa de la llama sobre las superficies calefactoras de la caldera para cualquier carga de caldera.

Las calderas de tubos de humos, a causa de su diseño compacto, operación y marcha automática, así como su resultante mantenimiento reducido, tienen una esperanza de vida menor, en general, que la de las calderas de tubos de agua. Las expectativas de vida están afectadas por el sobrecalentamiento, subida de carga rápida así como cortes o enfriamiento rápidos y programas de tratamientos de agua pobres o inexistentes.

El *registro de las temperaturas de salida de gases*, especialmente en las calderas compactas SM es un método excelente para determinar si una caldera de diseño compacto está siendo recalentada o si es necesario limpiar las superficies de transferencia térmica por ensuciamiento en el lado de humos o por depósitos en el lado de agua. La temperatura de salida de gases debería registrarse cuando la caldera está nueva o después de una limpieza, para establecer las lecturas o valores dados por el fabricante. Un fabricante de calderas SM de hogar interior recomienda limitar las temperaturas de chimenea y, por ello, quemar a un máximo de 65 °C por encima de la temperatura del vapor o agua caliente.

La siguiente tabla puede usarse como referencia para registro de temperaturas de salida de gases de caldera.

Presión de vapor de caldera, kg/cm²	Temp. máx. permitida en caldera pirotubular de hogar interior (Marina Escocesa) SM, °C
1,05	204
1,75	214
3,5	231
5,25	243
7	253
8,75	262
10,5	269
12,25	276
14	281
14,25	296
21	303

Para calderas de calefacción de agua caliente con temperatura máxima del ACS de 99 °C, la temperatura de gases en chimenea no debería exceder de 182 °C*.

Ratios de carga en calderas. Este término se utiliza como guía para constatar el rango de producciones sobre el cual una caldera puede operar automáticamente, pero manteniendo el rendimiento o eficiencia punta o próximo a él. En calderas compactas pirotubulares, una relación de 5:1 es normal, o una carga del 20 al 100 por 100 es la relación garantizada de rendimiento.

ANTIGUAS CALDERAS DE TUBOS DE HUMOS

Se dará una descripción breve de las calderas HRT (horizontales pirotubulares con retorno) calderas económicas y calderas de locomotora. Aunque estas calderas están siendo reemplazadas generalmente por calderas SM de hogar interior, los exámenes de licencia para operadores e inspectores pueden tener preguntas relacionadas con estas viejas calderas, porque algunas de ellas están utilizándose todavía.

Calderas tubulares de retorno horizontal

La caldera HRT (Fig. 2.5*a* y *b*) consta de una envolvente cilíndrica, hoy en día normalmente soldada, con tubos de igual diámetro que corren a lo largo de la envol-

* *N. del T.:* En España, para calderas de calefacción y ACS, la normativa ITIC coloca en 240 °C la temperatura máxima de salida de humos en chimenea, de forma que un pirostato corta el quemador si se sobrepasa esa temperatura para que se revise la anomalía antes de reencender el quemador.
ACS son las siglas de Agua Caliente Sanitaria.

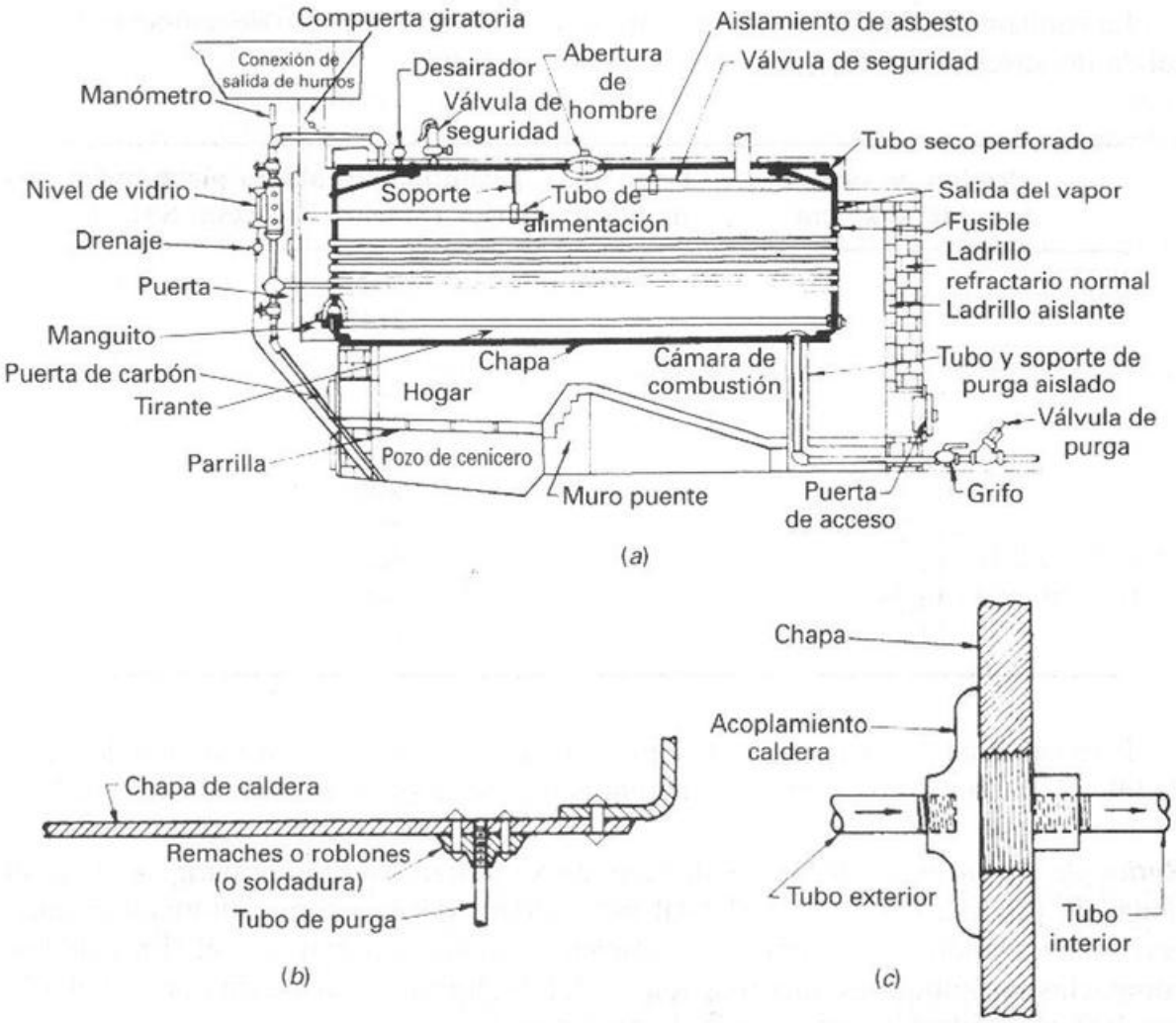


Figura 2.5. Detalles de caldera de tubos horizontales con retorno: (*a*) Componentes principales. (*b*) Conexión de purga que precisa refuerzo. (*c*) Detalles del acoplamiento y de la inserción tubo a través de la chapa de caldera.

vente y a través del volumen ocupado por el agua. El espacio o volumen por encima del nivel de agua sirve como separación y almacenaje de vapor. Un bafle o chapa separadora de agua (también llamado de tipo seco) se suministra normalmente cerca de la salida de vapor para obtener una sequedad del vapor mayor.

La caldera HRT es de construcción sencilla, tiene un bajo precio de coste y es un buen generador de vapor. Es más económica que los tipos de caldera tubular vertical o de locomotora, pero la caldera de hogar interior SM las ha reemplazado. Una desventaja es que los depósitos duros de incrustación son difíciles de arrancar de las superficies de agua de las filas de tubos principales. Otra desventaja es el peligro de quemado de las chapas que están justo encima del fuego o llama si hay depósitos o capas espesas de lodo del lado de agua sobre esta chapa de caldera. Pero estas dificultades de limpieza de incrustaciones de lodos son comunes para todas las calderas pirotubulares.

Las calderas tubulares horizontales no son muy prácticas en tamaños de chapa exterior de más de 96″ (243,8 mm) de diámetro o para presiones que excedan de los 200 psi (14 kg/cm^2). Las chapas gruesas o chapones para mayores presiones están

expuestas directamente a las llamas y se deterioraron muy rápidamente por el calentamiento, a causa de la pobre transferencia térmica al agua. Se podrían producir ampollas o bolsas en la chapa.

La hinchazón o embolsamiento de la chapa también es el resultado de la acumulación de lodos u otros sedimentos del agua depositados en el fondo de la chapa. Por esta razón, una caldera tubular de retorno horizontal deberá tener un picaje o tomo de 2,54 cm a 5,0 cm de la conexión de purga. Asimismo debe usarse una purga correcta y un tratamiento químico adecuado del agua para evitar depósitos o formación de sedimentos y para mantener una mínima proporción de sólidos disueltos*.

En las viejas calderas HRT, la línea de purga puede estar en el camino de los gases calientes y por ello debe protegerse del sobrecalentamiento. Un pilar o puente de refractario en forma de U, normalmente colocado enfrente del tubo de purga (resguardándolo), lo protege de los gases calientes. Si no estuviera convenientemente protegido, el tubo de purga podría fundirse bajo ciertas condiciones, drenar la caldera y, posiblemente, conducir a una seria explosión.

Conexión de purga. El tubo de purga no puede ser roscado sólo a la chapa, porque puede no haber suficiente número de roscas alojadas o pasos en la chapa en contacto para dar un soporte adecuado. En vez de ello, se remacha un soporte (o se suelda) a la parte inferior de la chapa y se atornilla el tubo de purga a este soporte o almohadilla (Fig. 2.5*b*).

El tamaño mínimo del tubo de purga para calderas de más de 10 HP (o de más de 9,3 m^2 de superficie de calefacción) debería ser 1″ (25,4 mm). Un tamaño mínimo de 3/4″ (19 mm) está permitido por la mayoría de los estados (en EE. UU.) para calderas de menor tamaño que el citado. El tamaño máximo de tubo de purga debería ser en cualquier caso de $2\frac{1}{2}$″ (63,5 mm) de diámetro.

Véase la Figura 2.6 de la página siguiente. Este tipo de soporte estructural en perfilería de acero laminado se precisa en todas las calderas de retorno horizontal (HRT) de 72″ (182,9 mm) de diámetro y mayores, ya que los muros de refractario no pueden soportar este peso tan elevado. En las calderas viejas, el recubrimiento o unión entre chapas estaba coronado con remaches o roblones diseñados con un factor de seguridad de 12,5. Pero si la unión era soldada, todos los cordones de soldadura se requerían íntegros (no por puntos) y esta soldadura debía estar descargada de tensiones residuales en calderas de alta presión. No se requería radiografía.

Entrada de agua de alimentación. El agua de alimentación debería entrar por la parte superior de la virola o chapa o por la zona frontal, y debería descargar fuera de toda zona de cordones o soldaduras o zona de caldera expuesta a la radiación o a temperaturas elevadas.

Si la caldera es de más de 40″ (101,6 mm) de diámetro, llevará una entrada de hombre por encima de los tubos. Así, el tubo de alimentación debería entrar a través de una pieza de acoplamiento de caldera (Fig 2.5*c*). Una prolongación interior del tubo debería hacer la descarga de agua aproximadamente a 3/5 de la longitud de la

---

* *N. del T.:* Lamentablemente en España, la costumbre entre los usuarios de estas calderas pequeñas y medianas es *no tratar el agua* y que la caldera dure menos tiempo, pues cuando se rompe se compra otra nueva en vez de adquirir un equipo de tratamiento de agua.

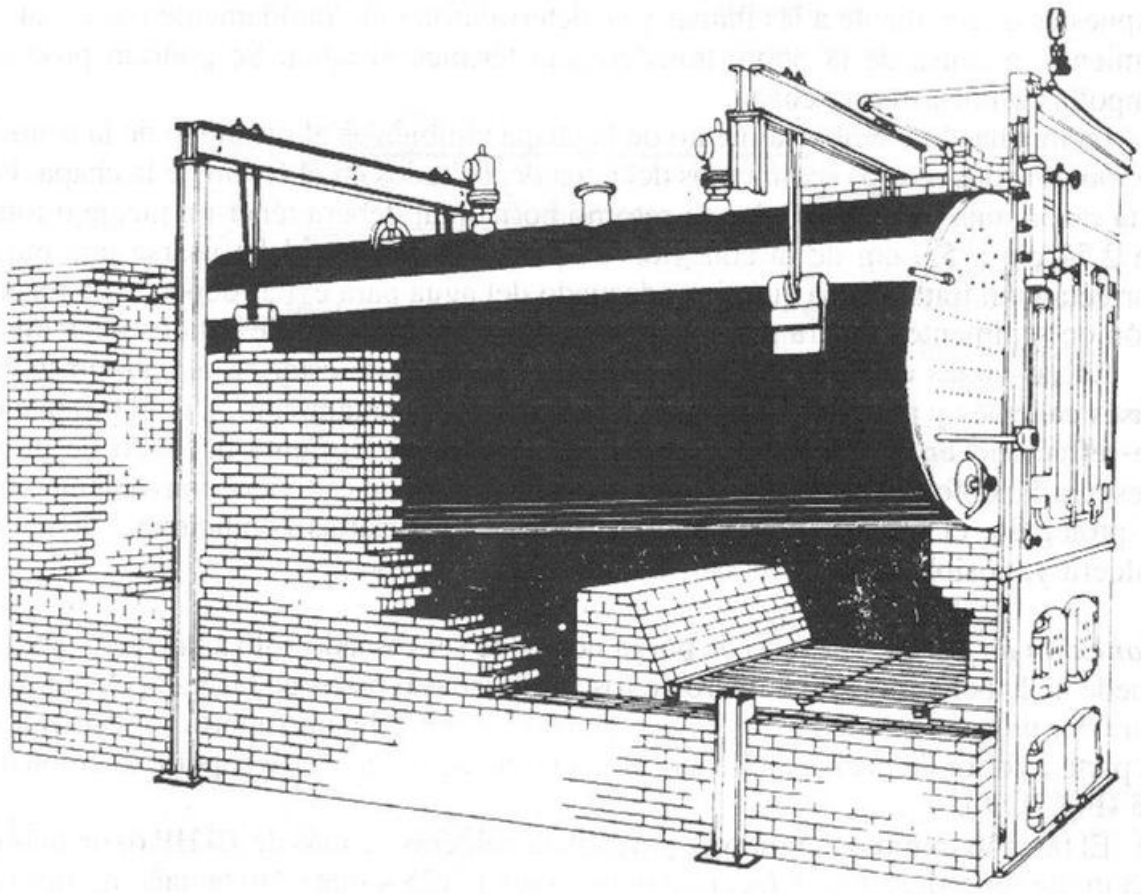


Figura 2.6. La caldera HRT, de 72" (183 cm) de diámetro y mayores, tiene que ser soportada por una estructura de acero independiente de las paredes de refractario, debido al elevado peso. (*Cortesía de Power magazine.*)

caldera a partir de la zona final más caliente, normalmente desde el frontal o frente de caldera, de forma que los sólidos que hay en el agua de alimentación no precipiten sobre la chapa frontal, donde podrían producirse daños por sobrecalentamiento.

Las restricciones circulatorias en las calderas HRT no son comunes, aunque son posibles si se depositan capas gruesas de depósitos y bloquean el espacio entre tubos. En tales casos es probable que el daño resultante pudiera ocurrir en la caldera por recalentamiento y como consecuencia de la falta de circulación en las zonas afectadas.

Tasas de producción. El medio o la forma convencional de tasado de una caldera es de acuerdo a su superficie calefactora. La mayoría de las autoridades aceptan la norma de 10 pies cuadrados (0,929 $m^2 \simeq 1\ m^2$) de superficie calefactora por HP* de caldera. La superficie calefactora (de agua) de este tipo de calderas se toma como una mitad del área de la chapa más el área total de todos los tubos, basada en su diámetro interior, más dos tercios del área libre del tubo menos el área o superficie agregada de los agujeros u orificios de los tubos.

---

* *N. del T.:* 1 HPh = 273.446 kgm o 641,18 kcal o 0,75 kWh.
O bien: 1 kWh = 1,36 CVh = 1,34 HPh. 1 HP = 0,75 kW

$$SH = \frac{(L \times {}^1/_2\pi D) + (N \times d \times \pi \times l) + (0{,}5236D^2 - N \times 0{,}7854d^2)}{144}$$

donde L = longitud de la chapa de caldera expuesta a los gases de combustión, en pulgadas.
D = diámetro de la chapa o virola, en pulgadas.
N = número de tubos.
l = longitud de los tubos, en pulgadas.
d = diámetro interior del tubo, en pulgadas.
SH = superficie calefactora (del agua), en pies cuadrados*.

El área de chapa frontal de los tubos debe despreciarse, ya que la temperatura de los gases es generalmente baja para producir mucha evaporación en este punto. Un décimo de este resultado será la potencia en HP a 100 por 100 de carga. El equivalente en evaporación de 1 HP de caldera, 34,5 libras/hora (15,63 kg/hora) de vapor con el agua de alimentación a 212 °F (100 °C), puede excederse si se fuerza la caldera a una producción mayor que la hallada por la norma de la superficie calefactora, pero hasta aproximadamente 125 al 160 por 100 es la limitación práctica normal para este tipo de calderas. Forzando la caldera por encima de este límite puede haber problemas y por ello no es recomendable, sino más bien todo lo contrario.

Inspección. Por estar expuesta la chapa o viola de hogar al fuego, una caldera de hogar interior precisa unos cuidados e inspecciones para descubrir y evitar depósitos, ampollas e hinchazones de chapa.

Durante una inspección, algunas de las zonas a inspeccionar cuidadosamente, en una caldera de hogar interior, son las siguientes: interiormente, en la zona superior de los tubos, comprobar el picado y la corrosión. Mirar en las juntas de cabezales, virolas, cabezas de remaches o cordones rotos, soldaduras, remaches y tubos. Comprobar los asientos o uniones para evitar grietas, poros, remaches rotos y adelgazamiento de chapa en la zona de nivel de agua de la virola exterior. Comprobar las riostras para probar su consistencia y tensión adecuadas. Examinar el tubo interior de alimentación de agua para probar su consistencia y la de su soporte y comprobar que no esté parcialmente obstruido. Comprobar las conexiones de las columnas de agua, válvulas de seguridad y manómetro para ver si están obstruidas por depósitos. También comprobar la virola y superficies tubulares para ver si tienen depósitos. Seguir el mismo proceso interiormente por debajo del haz tubular. Después comprobar la abertura para las conexiones de purga y asegurarse de que la parte inferior de la virola está inclinada hacia la purga y que no hay ampollas ni hinchazones.

Exteriormente, retirar los conectores de los manguitos de las conexiones de agua y asegurarse de que están libres de depósitos y óxido. Examinar la tubuladuras de purga y su asiento o conexión y asegurarse de que el tubo está protegido del fuego directo, que el tubo es sólido y que las válvulas de purga están en buen estado. Examinar los extremos de los tubos y roblones o soldaduras para detectar grietas y adelgazamientos del espesor de pared del tubo (tubos) en la chapa a la que están

* Equivalencias: 1″ = 2,54 cm; 1 pie cuadrado = 0,0929 m^2; 1 m^2 = 10,7642 pies cuadrados.

conectados. Comprobar la inexistencia de grietas causadas por la llama alrededor del asiento circunferencial y para detectar fugas en los bordes de los remaches. Después examinar el asiento y los soportes para ver su solidez.

Caldera económica

La caldera de tipo económico (Fig. 2.7) fue una adaptación de la caldera HRT que da algo más de superficie de calefacción por metro cuadrado de espacio ocupado en planta. Una ventaja adicional es que la cantidad de ladrillo refractario y obra es mucho menor ya que la caldera es autoportante en su armazón. Las zonas delantera y trasera están soportadas por unas curvas o castilletes bajo la virola. Las calderas de este tipo pueden transportarse como una unidad con las paredes del hogar en su posición encastradas en un armazón de acero. Los principios de construcción, conexiones de tubos y circulación son esencialmente los mismos que los de la caldera HRT. También las limitaciones prácticas de presión y capacidad son similares.

Si la sección de la virola es oval, la superficie plana a cada lado (lateral) requiere arriostramiento como superficie atirantada. Este requisito se cumple por medio de tirantes que pasan entre las filas horizontales de tubos de lado a lado. Los finales de

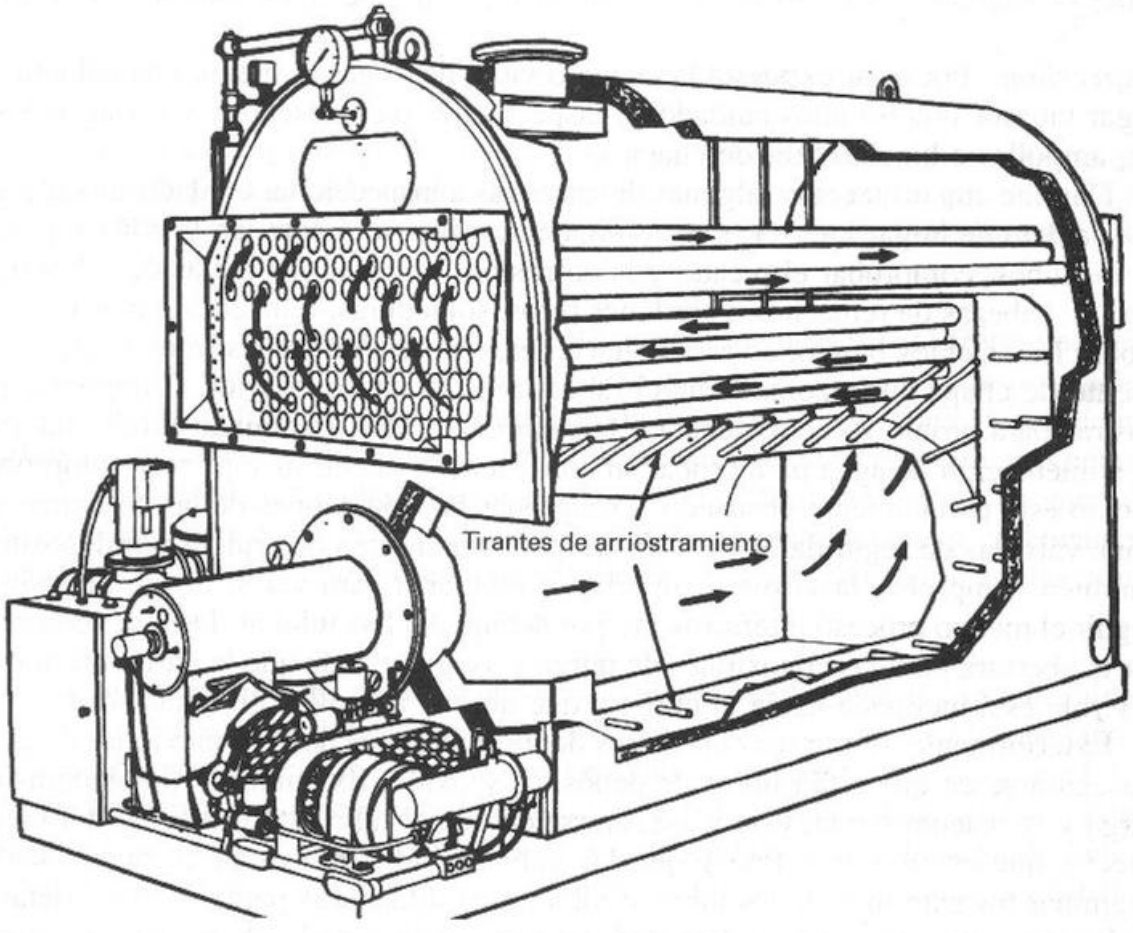


Figura 2.7. Caldera pirotubular del tipo económico, de tres pasos con chapa, bóveda y superficies arriostradas.

estos tirantes están remachados (roblonados) exteriormente. El paso y tamaño de estos tirantes se calculan por el mismo método que para los arriostramientos diagonales de una caldera HRT.

En la caldera económica, el fusible, si se utiliza, se sitúa en el cabezal o cara trasera. Si la distancia entre la fila superior de tubos y la parte superior de la virola es más de 13″ (330 mm) el fusible debe estar al menos a 2″ (50,4 mm) por encima de la fila superior de tubos. De otro modo, puede estar colocado no más bajo que la parte superior de la última fila de tubos.

Calderas-hogar de locomotora

Véase la Figura 2.8 de la página siguiente. Como los tipos de caldera vertical tubular y marina escocesa, la caldera con caja de fuego (hogar) de locomotora es una unidad pirotubular con los gases por el interior de los tubos de humos, pero su virola de chapa es horizontal y el hogar no está contenido dentro de la parte cilíndrica de la caldera. El hogar o caja de fuego es rectangular con una parte superior curvada conocida como bóveda. Esta bóveda de chapa está soportada por riostras radiales atornilladas a la bóveda y a la chapa exterior. Los extremos de las riostras están roblonados. Las chapas internas del hogar están arriostradas a las chapas exteriores por tirantes o virotillos. El espacio entre estas chapas se llama caja de agua. Los tubos de humos están dentro de la virola y se extienden desde la chapa del hogar hasta la chapa de la caja de humos delantera de la virola. Este cabezal en la caja de humos se forma por extensión de la virola más allá de la chapa de arriostramiento de los tubos de humos.

La chapa frontal del hogar encima de la bóveda y la chapa encima de los tubos de humos están soportadas con riostras verticales. En algunos casos se usan también riostras diagonales para este propósito. El domo de vapor suministra espacio adicional de almacenaje de vapor y permite tomar la salida principal de vapor a una altura considerable por encima de la línea de nivel de agua, reduciendo así la posibilidad de arrastre de agua con el vapor. El espacio de vapor se extiende sobre el hogar y la virola cilíndrica, que normalmente lleva tubos de 3″ (76,4 mm) de diámetro. Todos los tubos son de diámetro y longitud iguales.

Es cierto que para la mayoría de las calderas de tubos de humos interiores, algunos espacios o cajas de agua son muy difíciles de limpiar, bien sea mecánica o manualmente. También la caldera de locomotora y su hogar especial están limitados en cuanto a presión y capacidad, al igual que la caldera HRT.

Cajas de agua. El espacio de agua entre las chapas exteriores y las chapas del hogar se conoce como caja de agua y se utiliza en todos los hogares de calderas horizontales o verticales que tienen este tipo de construcción del hogar. Las chapas interior y exterior están abrochadas conjuntamente en la parte inferior bien con un anillo de codo o con un embridamiento en talón (véase la Figura 2.9 de la página 63). Esta última disposición es más cara, pero normalmente es más satisfactoria, porque es más fácil de mantener limpia. Una desventaja inherente a la brida en talón es que la acción alternativa debida a la expansión (dilatación) y contracción del hogar puede causar tensiones de fatiga y rotura. La construcción más moderna haría un embridado de la chapa interior y exterior conjuntamente y las soldaría a tope,

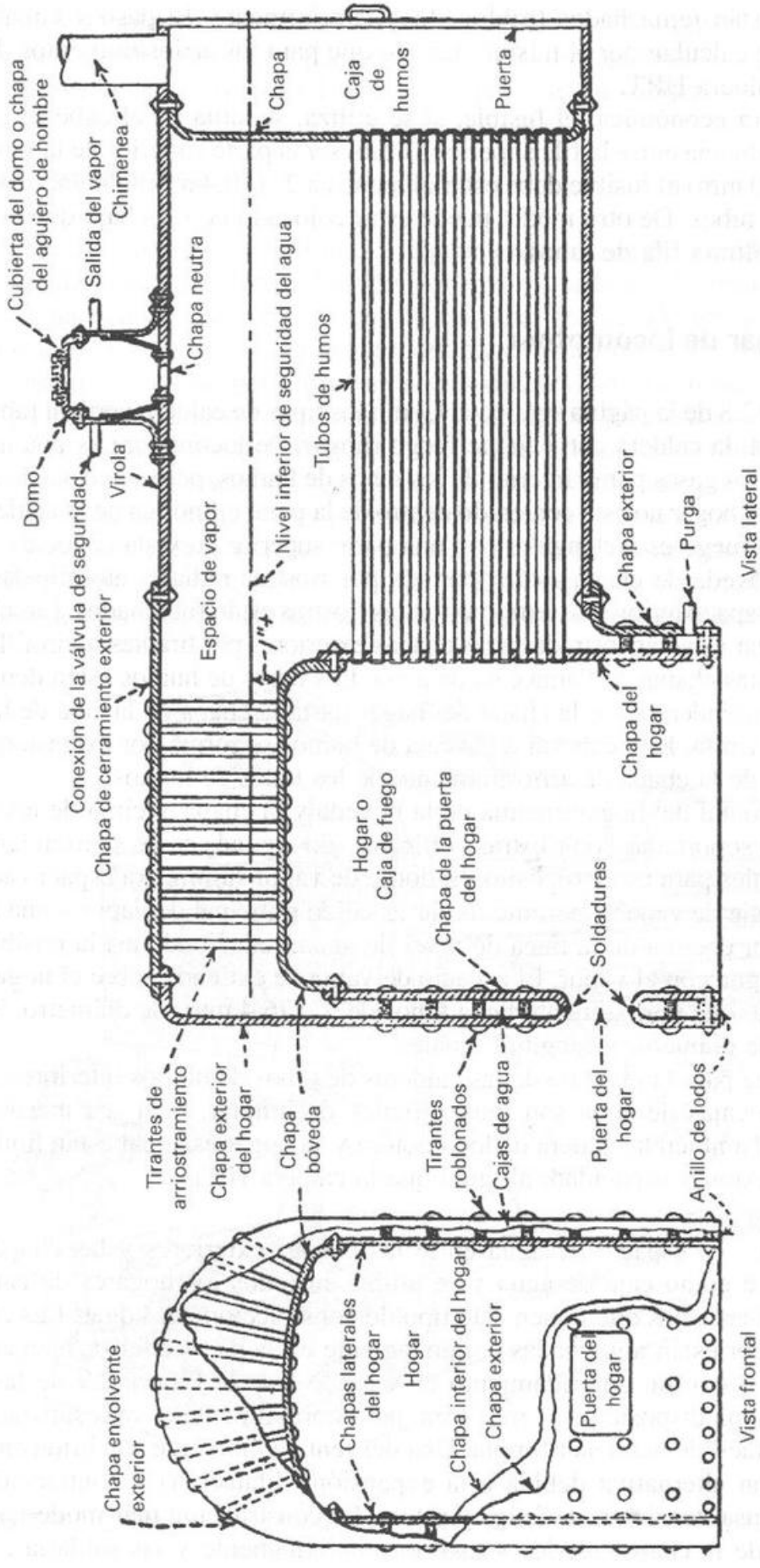


Figura 2.8. Caldera de locomotora mostrando los nombres de los componentes. No se muestra el arriostramiento de la chapa de los tubos de humos a la virola por las riostras diagonales para reforzar la zona encima de los tubos.

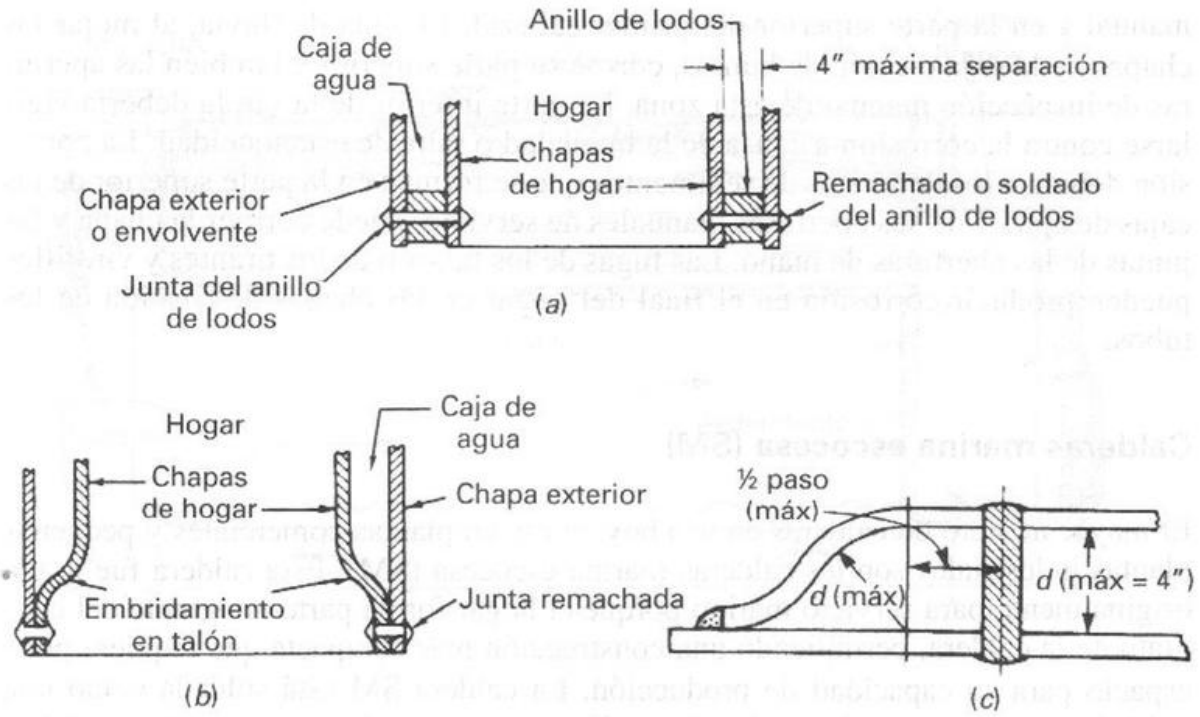


Figura 2.9. Detalles constructivos de la parte interior de las cajas de agua. (*a*) Cierre tipo anillo de lodos. (*b*) Brida en talón roblonada. (*c*) Cierre embrindado en talón con soldadura.

como se ve en la Figura 2.3. La mayoría de las calderas de locomotora están equipadas con domo de vapor porque así se delimita el espacio de vapor y la superficie del agua y queda más espacio para que el caudal de vapor se separe de las gotitas de agua como es deseable. Un servicio adicional para el domo de vapor en el servicio ferroviario es alojar la válvula de salida de vapor. El domo de vapor está instalado normalmente con su junta vertical en una de las caras laterales del domo y éste, por supuesto, sobre un lado de la virola de la caldera. Así, el asiento longitudinal del domo no tendrá que estar embridado tan puntualmente.

Es importante proteger la chapa del hogar del recalentamiento en el anillo inferior de lodos. También las partes inferiores de las cajas de agua pueden llenarse con sedimentos y esta zona, por tanto, también deberá ser protegida.

En las instalaciones llevadas manualmente, la parrilla está por encima de esta zona. Pero con el calentamiento o alimentación mecánica, deberá construirse un muro de refractario unos 6″ (150 mm) por encima del anillo de lodos por todos los lados del hogar.

Inspecciones. Debido a la corrosión interna, hay que comprobar: 1) línea de nivel de agua y fila superior de los tubos a causa del oxígeno y otras impurezas dejadas por el agua al hervir; 2) parte superior de la bóveda, sobre todo alrededor de los finales de los tirantes y virotillos radiales; 3) cajas de agua a causa del oxígeno y de la presencia de sedimentos corrosivos; y 4) parte superior de la virola donde tiene lugar el picado si la caldera se deja fuera de servicio sin tomar las precauciones adecuadas.

La corrosión externa sobre el hogar de una caldera de locomotora debería vigilarse especialmente en las chapas próximas y alrededor de las aberturas de maniobra

manual y en la parte superior del primer cabezal. El agua de lluvia, al mojar las chapas de la caja o cajón de humos, corroe su parte superior y también las aperturas de inspección manual de esta zona. La parte inferior de la virola debería vigilarse contra la corrosión a causa de la humedad o falta de estanqueidad. La corrosión debida a los depósitos de sedimentos que se forman en la parte superior de las cajas de agua y de sus aberturas manuales de servicio, puede corroer la chapa y las juntas de las aberturas de mano. Las fugas de los tubos o de los tirantes y virotillos pueden producir corrosión en el final del hogar en las chapas de fijación de los tubos.

Calderas marina escocesa (SM)

El mayor número de calderas en uso hoy en día en plantas comerciales y pequeñas plantas industriales son las calderas marina escocesa (SM). Esta caldera fue usada originalmente para servicio marino porque el hogar forma parte integrante del conjunto de la caldera, permitiendo una construcción más compacta que requiere poco espacio para su capacidad de producción. La caldera SM está soldada como una unidad compacta que consta de una vasija o recipiente de presión con quemador, controles, ventilador de tiro, controles de tiro y otros componentes ensamblados en una unidad completamente probada en fábrica. La mayoría de los fabricantes prueban sus modelos como un conjunto solidario antes de su expedición y transporte a su destino; básicamente entregando un producto que está prediseñado y listo para una conexión e instalación rápida a los servicios de agua, electricidad y combustible. Algunos fabricantes dan un servicio de puesta en marcha como parte del precio de compra. Un especialista entrenado en fábrica pone en marcha la unidad, reajusta los controles, comprueba la unidad en marcha, hace los ajustes necesarios y enseña al operador para que no tenga problemas con el control.

La caldera SM (de hogar interior y tubos de humos) está construida como un hogar de paredes húmedas, como se muestra en la Figura 2.10*b*, o de pared trasera de fondo seco, mostrada en la Figura 2.10*a*. Esta caldera es una adaptación a la práctica estacionaria de la bien conocida caldera escocesa de fondo húmedo. Consta de una virola o chapa cilíndrica exterior, un hogar, chapas frontal y trasera de haz tubular y chapa bóveda. Los gases calientes del hogar pasan desde la cámara de combustión con revestimiento refractario hacia la parte trasera (a veces construida sobre una placa o chapa fija o removible) y entonces retornan a través de los tubos de humos hasta el frontal de la caldera y después a la chimenea. Esta caldera es adecuada para combustión de carbón, gas y combustibles líquidos derivados del petróleo.

En el diseño de pared trasera húmeda (Fig. 2.10*b*), la construcción de la virola, tubos y hogar es similar al del tipo de pared trasera seca, pero la cámara de combustión, al estar instalada dentro de la virola, está rodeada de agua. Así no es necesario ningún refractario exterior ni la cámara de combustión. La parte trasera del tipo seco es de vaporización rápida a causa de su gran superficie de calefacción. Es también compacta y de fácil embalaje y muestra una economía francamente buena.

El hogar interior está sometido a esfuerzos de compresión y, por tanto, debe diseñarse para resistirlos. Los hogares, de relativamente pequeño diámetro y corta

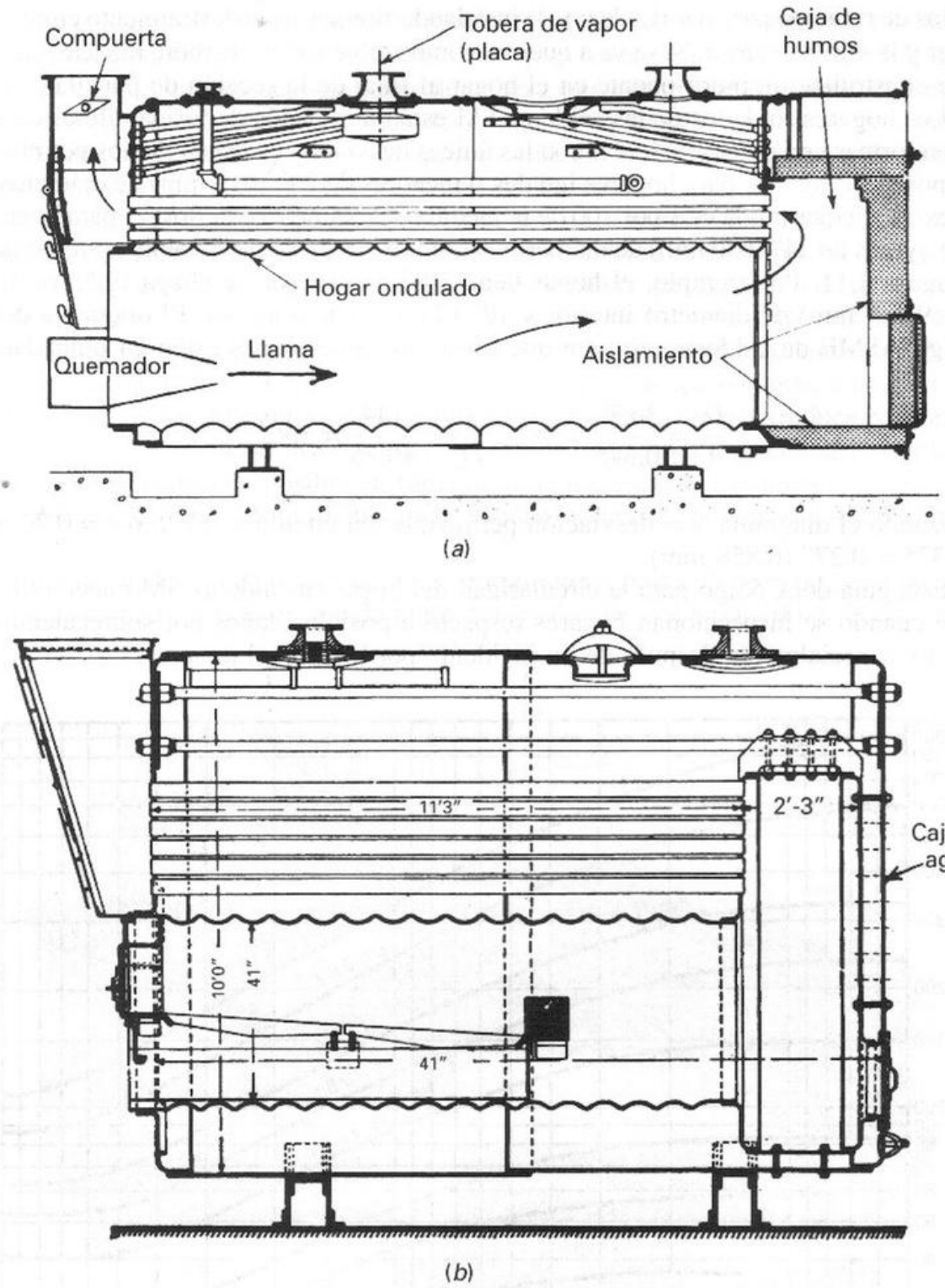


Figura 2.10. Caldera SM de hogar interior corrugado. (*a*) Tipo trasera seca. (*b*) Tipo trasera húmeda.

longitud, pueden ser auto-soportados si el espesor de chapa es el adecuado. Para hogares grandes, debe utilizarse uno de estos cuatro sistemas o métodos de soporte: 1) paredes del hogar ondulado corrugadas; 2) por división de la longitud del hogar en secciones con bridas de refuerzo (anillos Adamson) entre las secciones; 3) utilizando

anillos de refuerzo para dar rigidez; y 4) instalando tirantes de arriostramiento entre el hogar y la virola exterior. Si se va a quemar combustible sólido (carbón, madera, etc.) debe construirse un muro-puente en el hogar al final de la sección de parrilla.

Los hogares soldados de las calderas SM están laminados de forma cilíndrica y deben formar una sección circular con las únicas desviaciones más o menos permitidas por el Código: 1) para hogares iguales o menores de 24″ (610 mm) de diámetro, la desviación permitida es 1 por 100 de la medida del diámetro exterior; 2) para hogares mayores de 24″ (680 mm) de diámetro exterior debe utilizarse la tabla o gráfico de la Figura 2.11. Por ejemplo, el hogar tiene 3/8″ de espesor de chapa (9,53 mm), 36″ (914,4 mm) de diámetro interior y 12″ (3,65 m) de longitud. El diagrama del código ASME de calderas requiere que todas las dimensiones estén en pulgadas:

$$\frac{D_o}{t} = \frac{36{,}75}{0{,}375} = 98 \qquad \frac{L}{D_o} = \frac{144}{36{,}75} = 3{,}92$$

Utilizando el diagrama, e = desviación permisible del círculo = $0{,}72t$, o $e = 0{,}72 \times \times 0{,}375 = 0{,}27''$ (6,858 mm).

Esta guía del Código para la circularidad del hogar en calderas SM puede utilizarse cuando se inspeccionan hogares respecto a posibles daños por sobrecalentamiento, especialmente después de un incidente por bajo nivel de agua.

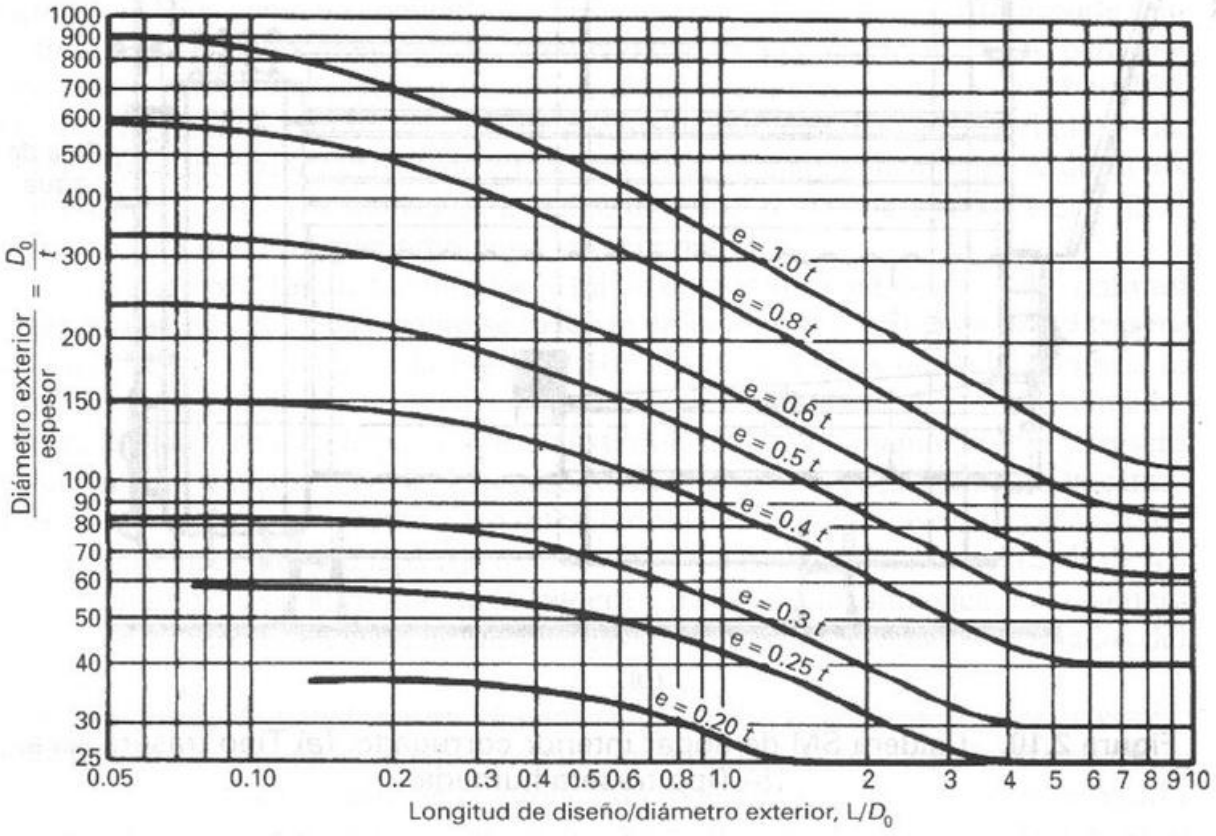


Figura 2.11. Sección I del código ASME. Diagrama para determinar la máxima desviación para un hogar circular, donde: t = espesor para el hogar, D_o = diámetro exterior del hogar, L = longitud del hogar. (*Cortesía de American Society of Mechanical Engineers.*)

La caldera SM de hogar interior puede ser, con mucho, la más grande en diámetro de las calderas pirotubulares, construyéndose hasta de 15′ (4,57 m) de diámetro. Debido a que el área del segmento de cabeza por encima de los tubos es grande, deben extenderse las riostras diagonales, ya que si no debería tomarse un gran número de ellas. En vez de ello, es costumbre utilizar un número pequeño de tirantes transversales de 2 a 3″ (50,8 a 76,2 mm) de diámetro.

En calderas de diámetro grande, es práctico utilizar más de un hogar. Dos, tres o incluso cuatro hogares se utilizan en las grandes calderas de este tipo. La Figura 2.12 es una vista en corte seccional de un modelo de cuatro pasos. Esta unidad mantiene una velocidad de gases alta de manera continua. Como los gases calientes atraviesan los cuatro pasos, como se ve en la Figura 2.13 de la página siguiente, transfieren calor al agua de la caldera y así se enfrían y ocupan menos volumen a medida que progresan por los diferentes pasos de tubos. El número de tubos se reduce proporcionalmente para mantener la velocidad elevada de los gases y así mantener la producción lo más constante posible en función de la transferencia térmica.

Mejor cuantos más pasos de gases puedan utilizarse; hoy en día 4 es el límite práctico.

El hogar de una caldera SM puede proporcionar hasta 65 por 100 de la producción de la caldera incluso cuando puede tener sólo del 7 al 8 por 100 de la superficie

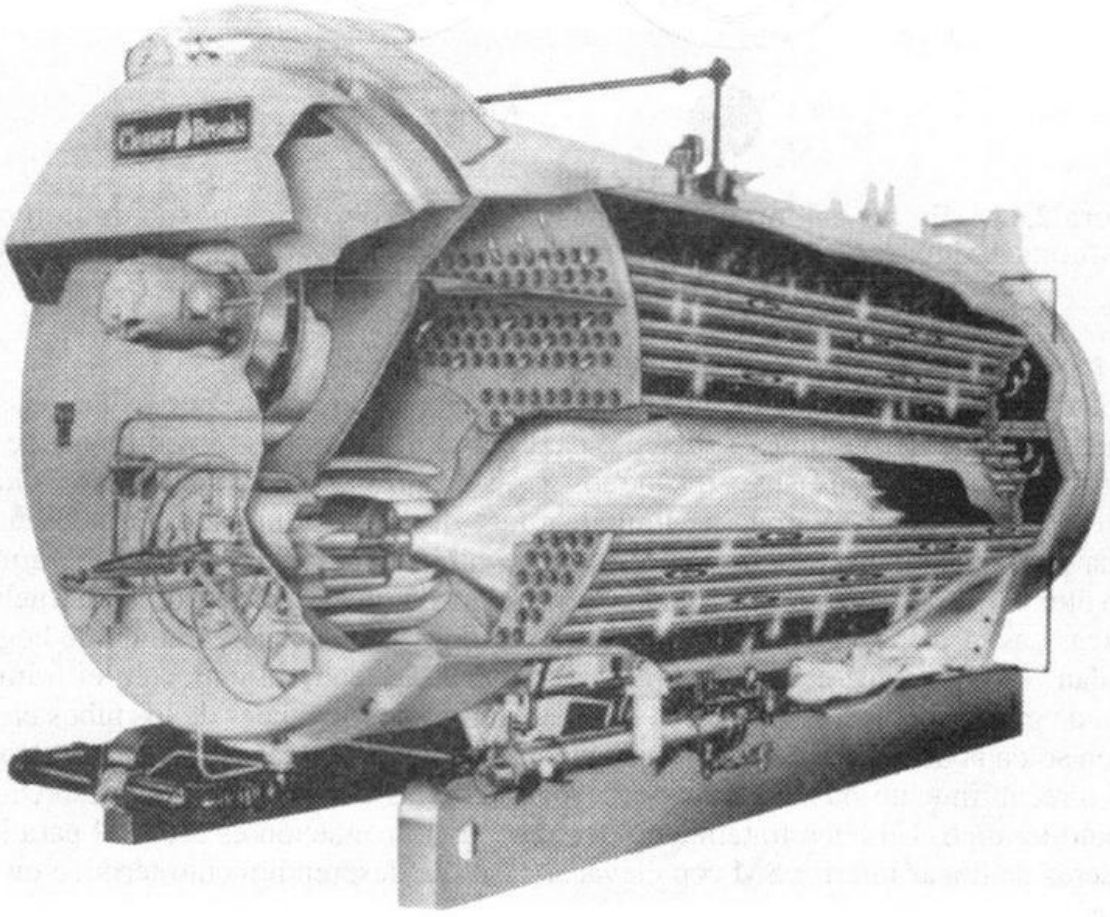


Figura 2.12. Caldera de hogar interior SM de cuatro pasos. (*Cortesía de Cleaver-Brooks Co.*)

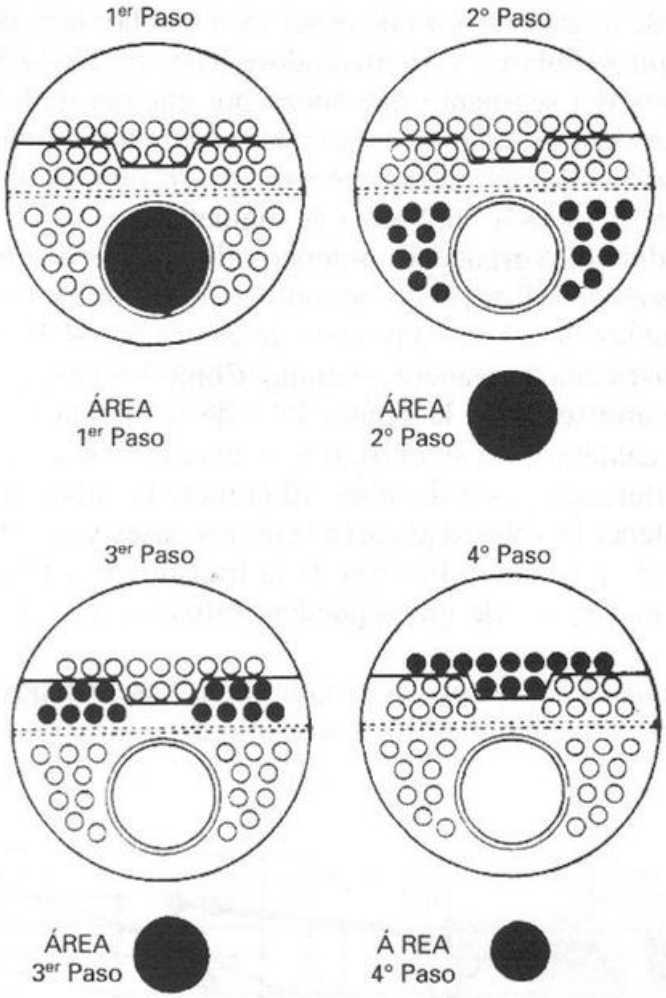


Figura 2.13. En las calderas de hogar interior SM de varios pasos de humos, los tubos recuperan calor de los gases enfriándolos y ocupando así menos volumen. (*Cortesía de Cleaver-Brooks Co.*)

calefactora total. En el hogar, la mayoría del calor se transmite por radiación. El hogar debería tener volumen suficiente para permitir la combustión completa de la mezcla combustible-aire antes de que los gases alcanzan los pasos de humos. Gran parte de los diseñadores trata de limitar la tasa de desprendimiento térmico en el hogar por debajo de las 150.000 BTU/hora/pie cúbico (1.334.939 kcalorías/hora/m^3) de volumen de hogar; de otro modo, la relación de aire a combustible se vuelve crítica. Las tasas por encima de 1.350.000 kcalorías/hora/m^3 de volumen de hogar puedan ocasionar que el combustible esté todavía ardiendo al entrar en el primer paso de gases, y esto a su vez puede originar roturas de los finales de los tubos en la unión soldada del tubo con las placas o chapas de anclaje de tubos. Cualquier depósito o recubrimiento puede agravar esta rotura con las tasas elevadas de desprendimiento térmico. Un buen tratamiento del agua de alimentación es esencial para las calderas de hogar interior SM con elevadas tasas de desprendimiento térmico en el hogar.

Existe también el problema de la corrosión en el lado de fuego cuando se utilizan combustibles con contenido de azufre. La corrosión puede ocurrir cuando las tempe-

raturas de chapa o tubo caen por debajo del punto de rocío ácido. El apagado y encendido del quemador requiere normalmente la purga del hogar, y esto puede también producir gradientes térmicos en la caldera que pueden originar roturas por los efectos de dilatación y contracción.

Los diseños compactos también tienden a hacer menos accesibles las superficies para inspección y limpieza. Así, las tasas elevadas de transferencia térmica pueden fácilmente producir recalentamiento, especialmente si la transferencia está forzada. Véase la Figura 2.14. Esto da como resultado pérdidas de los tubos en las placas tubulares, roturas o grietas por las soldaduras en las uniones placa-tubo, grietas en las soldaduras en las zonas de alta densidad térmica, hogares con ampollas en la chapa y bajada del nivel de agua. Incluso más peligroso es la credibilidad total de los controles automáticos en la seguridad del ciclo de la caldera, sin un control o comprobación periódica de: 1) condiciones y estado de los contactos eléctricos; 2) conexiones eléctricas; 3) conexiones o uniones de la columna de agua; 4) inmersión y acción de la presión en el lago de agua sobre los controles sumergidos; 5) desconexión del combustible por bajo nivel de agua; 6) acumulación de hollín o cenizas en los tubos de humos; 7) operación de las electroválvulas en el corte de líneas de combustibles; 8) temporización de encendido del quemador y operación del dispositivo de corte de llama por célula; y 9) operación de las válvulas de seguridad de caldera.

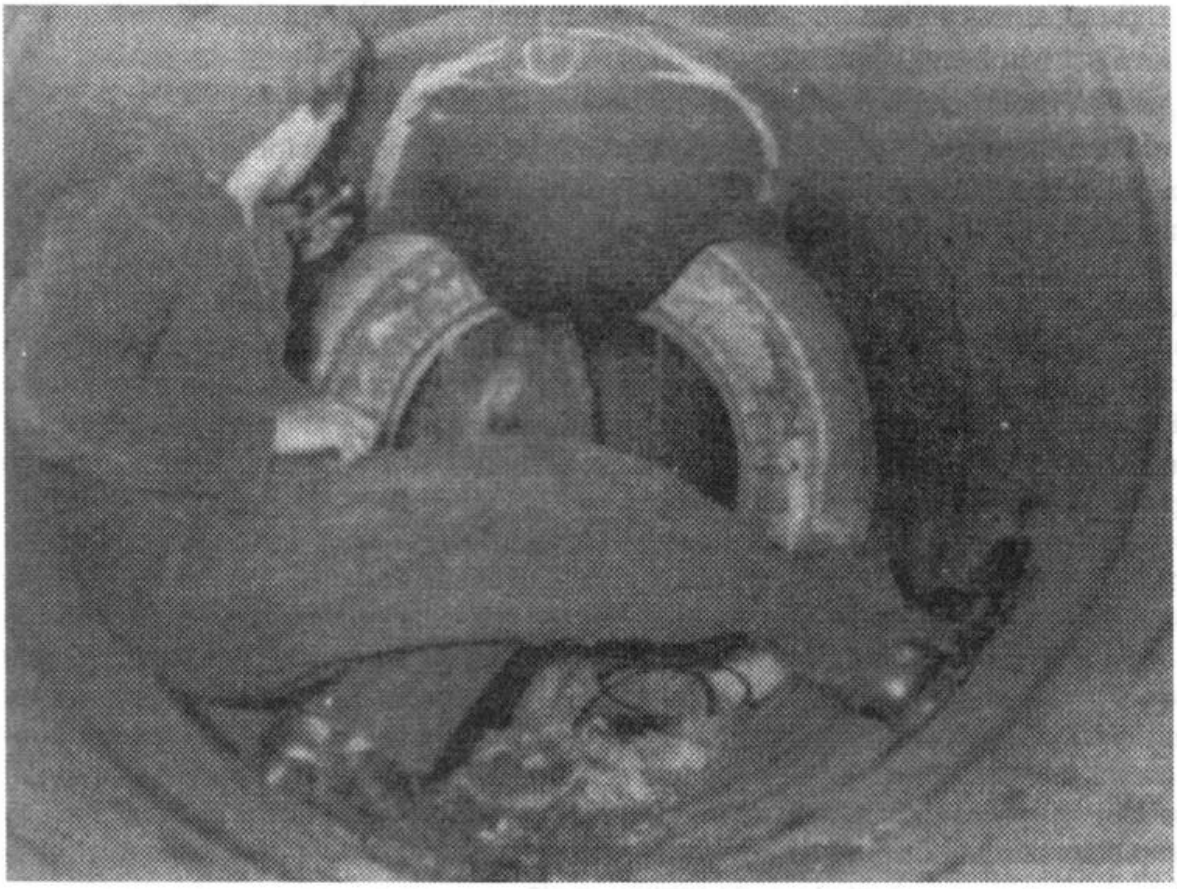


Figura 2.14. Hogar de caldera pirotubular colapsado por bajo nivel de agua. (*Cortesía de Seguros Royal Co.*)

Caldera tubular vertical

La caldera vertical de tubos de humos se utiliza cuando apremia y es precaria la superficie en planta y los requisitos de presión y capacidad entran dentro del alcance de este tipo de caldera. La caldera tubular vertical (TV) es una unidad caldeada interiormente por tubos de gases. Es una unidad autocontenida que precisa poca o ninguna obra de refractario. Al necesitar poco espacio es muy popular para servicios portátiles o transportables, tales como grúas, *martinetes o hinca pilotes o dragalinas*, motor de grúas y equipos de construcción similar. Las calderas tubulares verticales se utilizan para servicio estacionario que requiere presiones y capacidades de producción medias para procesos tales como prensas, aplicaciones de secado y planchado en lavanderías industriales y en la industria del plástico.

La caldera de tubos de agua de tipo serpentín es un competidor de toda caldera tubular vertical en pequeñas capacidades y presiones bajas de hasta 10,5 kg/cm^2. Pero la caldera tubular vertical está limitada en capacidad y presión incluso más que la caldera de hogar interior horizontal tubular. Por esta razón, la mayoría de las calderas tubulares verticales del tipo pirotubular a menudo exceden de 300 HP, o alrededor de 4.500 kg/hora de capacidad de producción con una presión máxima de 14 kg/cm^2. Existen cinco grupos generales o clasificaciones:

1. De virola normal recta con la parte superior seca (Fig. 2.15*a*).
2. De virola normal recta con la parte superior húmeda (Figura 2.15*b*).
3. Caldera «Manning» con hogar aumentado.
4. Fondo estrechado gradualmente con hogar aumentado.
5. Unidad vertical sin tubos para las capacidades incluso menores.

La caldera tipo *Manning* y la de fondo estrechado proporcionan una mayor superficie de parrilla y volumen de hogar, o que permite una mayor eficiencia o rendimiento de combustión.

La unidad del tipo de cabezal inverso fue desarrollada para evitar el sobrecalentamiento de los finales de la parte superior de los tubos que están en la zona o espacio del vapor en la caldera vertical pirotubular. Daños y recalentamiento son, a veces, el resultado de forzar esta última caldera o cuando el fuego se mantiene demasiado fuerte en el arranque. Un fuego suave, bajo, es esencial hasta que comience la vaporización. Entonces los tramos finales de los tubos pueden ser «refrigerados» por el vapor.

Las ventajas de las calderas pirotubulares verticales son: 1) compacidad y manejabilidad; 2) bajo coste inicial; 3) muy poca superficie requerida por HP de caldera; 4) no se precisa un asentamiento especial; y 5) instalación rápida y sencilla.

Las desventajas son: 1) el interior no es fácilmente accesible para limpieza, inspección o reparación; 2) la capacidad en agua es pequeña, haciéndose difícil mantener una correcta presión de vapor bajo variaciones de carga; 3) la caldera es propensa a los arrastres (llevados por el vapor) cuando se trabaja a plena carga a causa del pequeño espacio de vapor; y 4) la eficiencia o rendimiento es bajo en los tamaños pequeños porque los gases o humos tienen un corto recorrido, y directo, a la chimenea, de forma que se desperdicia mucho calor.

Los depósitos y lodos se depositan en las cámaras de agua de 4″ (100 mm, máximo permitido por el Código), ya que tienen una circulación muy restringida.

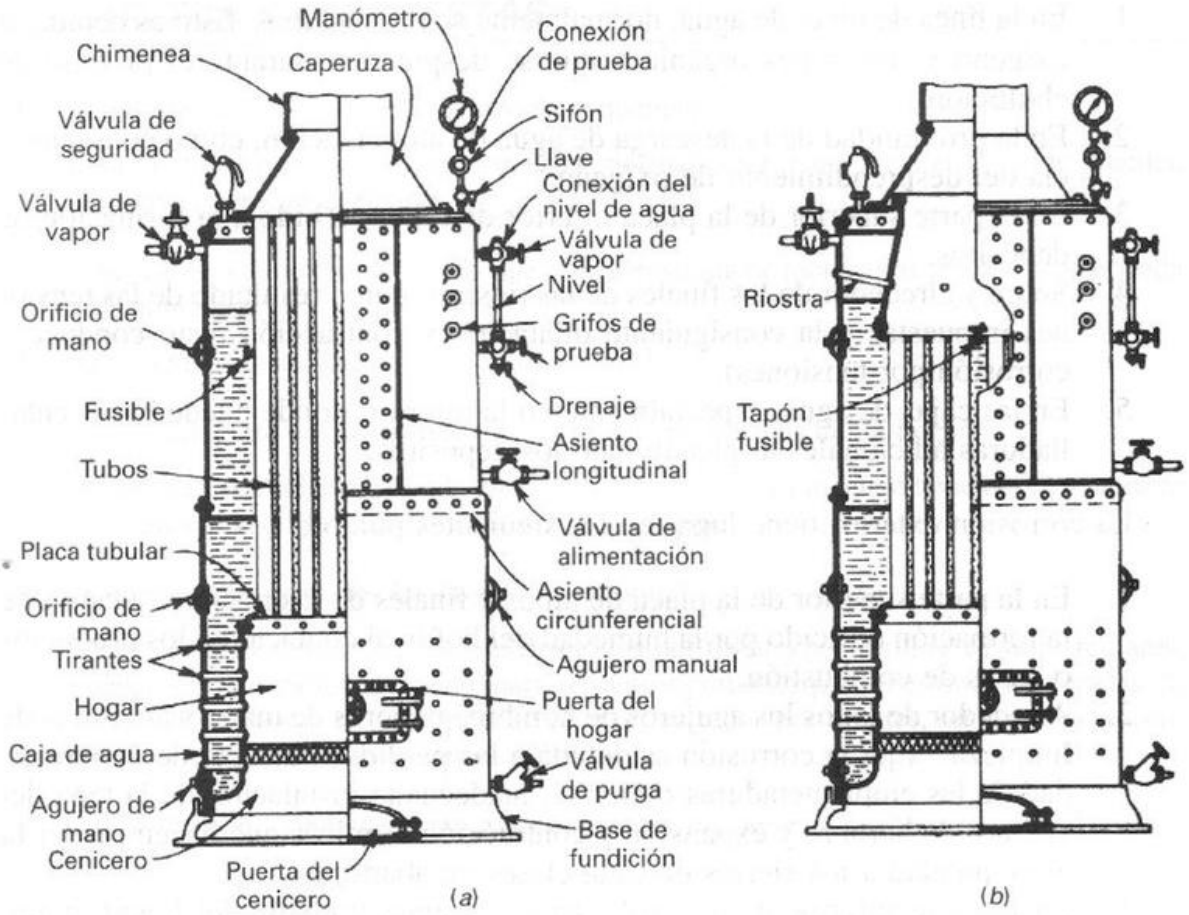


Figura 2.15. Caldera tubular vertical. (*a*) Diseño de parte superior seca. (*b*) Diseño de parte superior húmeda.

Las aberturas de limpieza deberían abrirse periódicamente y circunferencialmente en las cámaras de agua y parte inferior de la placa de tubos, de forma que todas las superficies queden accesibles para limpieza. Algunas unidades tienen un drenaje continuo en la parte inferior de las cajas de agua. Cuando esta caldera se abre para limpieza, se puede trabajar con una cadena alrededor de la circunferencia para conseguir que el lodo y depósitos pueden eliminarse desde las aberturas de limpieza.

La normativa no indica un nivel específico de agua para la caldera de parte superior seca excepto constatar que «deberá» ser un nivel en el cual no haya peligro de sobrecalentamiento de ninguna parte de la caldera cuando esté trabajando con ese nivel. Pero el nivel se forma generalmente como mínimo en un punto sito a 2/3 de la altura de la virola, debajo del cabezal o parte superior de la caldera o placa de tubos o bóveda de tubos. Éste es el mismo requerimiento mínimo que para las calderas miniatura verticales de tubos de humos.

Para las de parte superior sumergida (inundada) de tipo húmedo, el nivel mínimo de agua ha de estar al menos 2″ (50,8 mm) por encima de la parte final de los tubos, excepto para las calderas miniatura, donde estará a 1″ (25,4 mm).

La corrosión interna y externa normalmente tendrá lugar en una caldera vertical de tubos en las siguientes zonas:

1. En la línea de nivel de agua, normalmente sobre los tubos. Esto es debido al oxígeno y materiales orgánicos que se desprenden durante el proceso de ebullición.
2. En la proximidad de la descarga de agua de alimentación, como consecuencia del desprendimiento de oxígeno.
3. En la parte superior de la placa inferior de tubos, debido a la formación de depósitos.
4. Sobre y alrededor de los finales de las riostras, como resultado de las tensiones impuestas y la consiguiente dilatación y contracción (esto conduce a corrosión por tensiones).
5. En las cajas de agua, especialmente en la inferior, donde puede haber entalladuras adicionales al picado bajo los depósitos.

La corrosión exterior tiene lugar en los siguientes puntos:

1. En la parte superior de la placa de tubos y finales de los mismos, a causa de la formación de ácido por la humedad del hollín al contacto de los productos o gases de combustión.
2. Alrededor de todos los agujeros de hombre, agujeros de mano y aberturas de limpieza. Aquí la corrosión es debida a las pérdidas por falta de estanqueidad de las empaquetaduras o cierres, inadecuada instalación de la tapa del agujero de hombre y expansión y contracción térmicas que hacen perder la estanqueidad a los cierres de cada clases de aberturas.
3. En la parte inferior de la virola, cajas de agua y chapa del hogar, como resultado del ataque del hollín.
4. Alrededor de todas las conexiones, incluyendo manómetros, válvulas de seguridad, salida de vapor, conexión del agua de alimentación, conexión de purga y conexión de columnas de agua, a causa de las pérdidas o fugas.

SISTEMAS DE CALDERA MÚLTIPLE

Los sistemas de caldera múltiple se utilizan en muchas plantas con pequeñas calderas para obtener progresivamente una producción mayor por secuenciado de los encendidos de cada caldera, basándose en la demanda (véase la Figura 2.1). La ventaja de esta disposición en comparación con la operación de una caldera desde el 25 al 100 por 100 de carga, ya que por secuenciado según la carga, cada caldera puede operarse a plena capacidad y rendimiento, y así se obtiene el óptimo y máximo rendimiento de diseño. Esto reduce las pérdidas térmicas y de *stand-by*, especialmente donde existe una carga de calefacción a temperatura variable. Las calderas individuales también pueden aislarse para reparaciones y mantenimiento.

El sistema puede estar equipado de controles automáticos para conseguir el secuenciado de calderas según la demanda de carga. Los cuadros de control precableados de fábrica facilitan la instalación y servicio de los controles, si es necesario. El precableado se extiende al suministro de sistemas de calefacción multizona, ya sea por medio de válvulas automáticas o circulatorias.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS*

1. ¿Cuál puede ser la causa de explosión o quemadura de un tubo de humos?

   RESPUESTA: Los tubos de humos están normalmente bajo presión exterior. Pueden aplastarse, pero no quemarse.

2. ¿Qué caldera tiene chapa bóveda que esté arriostrada de modo similar a la chapa bóveda de locomotora?

   RESPUESTA: La caldera marina escocesa (SM).

3. ¿Qué caldera de hogar interior tiene frecuentemente más de un hogar?

   RESPUESTA: La caldera SM o la escocesa de trasera seca a menudo tiene de 2 a 4 hogares circulares cuando la caldera es de diámetro grande.

4. ¿Cómo están reforzados los hogares interiores?

   RESPUESTA: Si son planos, están arriostrados por tirantes y virotillos. Si son circulares, pueden ser de espesor suficiente para ser autosoportantes para presiones moderadas. Si no son de espesor suficiente, pueden estar arriostrados por tirantes, ser corrugados (ondulados) o reforzados con anillos Adamson.

5. ¿Si se utilizan, donde deberían estar colocados los tapones fusibles en una caldera?

   RESPUESTA: No por debajo de la línea inferior del nivel de seguridad.

6. *a*) ¿Cuál es el menor espesor necesario para una caldera tubular de tubos de acero para que se pueda instalar un tapón fusible?
   b) ¿Cuál es la presión y temperaturas máximas permitidas en tubos de cobre o conexiones en calderas de tubos de humos?

   RESPUESTA: *a*) 0,22″ (5,58 mm); *b*) 250 psi (17,5 kg/cm^2) y 406 °F (207,7 °C).

7. ¿Qué metal fusible se utiliza en los tapones fusibles térmicos? ¿Cuál es su punto de fusión?

   RESPUESTA: Estaño; de 445 °F a 450 °F (de 229,4 °C a 232,2 °C).

8. *a*) Especifique la razón del mandrilado de los finales de tubos de las calderas pirotubulares.
   b) Especifique la razón del rebordeado de los finales de tubos de las calderas de tubos de agua

   RESPUESTA: Ambos, el mandrilado, rebordeado o rebordonado incrementan la fuerza de sujeción de los tubos. Las pruebas han demostrado que un tubo mandrilado tiene más fuerza de sujeción que un tubo bordonado (rebordeado o pestañeado).

   a) El bordonado incrementa el poder de fijación de los tubos y elimina en un elevado grado la erosión o quemado de los terminales de tubo; además, el bordonado de los finales de tubo se utiliza en calderas pirotubulares.

---

* Utilizar la Sección I del código ASME de calderas para respuestas del Código.

b) El mandrilado de los finales de tubo aumenta el poder de fijación o sujeción de los tubos. Como el fuego no está en contacto con el final de los tubos de agua, los tubos en estas calderas están normalmente mandrilados.

9. Explique el significado de calderas calentadas exterior o interiormente.

RESPUESTA: Las calderas caldeadas exteriormente tienen un hogar separado construido fuera de la virola de la caldera. La caldera HRT es probablemente el ejemplo más ampliamente conocido de la caldera caldeada exteriormente. En las calderas de hogar interior, el hogar forma parte integral de la estructura de caldera. La caldera tubular vertical, la de locomotora y la SM son ejemplos bien conocidos de calderas caldeadas interiormente.

10. ¿Dónde están los tirantes más expuestos a rotura en el hogar de la caldera de locomotora?

RESPUESTA: Normalmente en la fila superior de tirantes y en la primera fila de riostras radiales, con fracturas que tienen lugar cerca de la superficie de la chapa exterior (chapa envolvente). Esta zona es un área de alta densidad térmica, que produce grandes movimientos de dilatación y contracción.

11. ¿Cuáles son los métodos de arriostramiento más comúnmente utilizados en una caldera HRT?

RESPUESTA: Se utilizan cuatro métodos:

1. Atirantado transversal: se usa bajo los tubos porque no hay sitio suficiente para otros arriostrados, que acumularían depósitos más fácilmente.
2. Los tirantes diagonales se utilizan por encima de los tubos para soportar la chapa plana no arriostrada que está por encima de los tubos.
3. Se utilizan también cartelas de arriostramiento por encima de los tubos.
4. Si los diámetros de caldera no están por encima de 914 mm y las presiones no sobrepasan los 7 kg/cm^2, pueden usarse angulares y otras formas de acero estructural, si se dispone, de acuerdo a los requerimientos del código ASME.

12. Cite tres causas de ampollas de la virola o chapa de una caldera de tubos de humos con retorno horizontal.

RESPUESTA:

1. El aceite (de lubricación de rodamientos, bombas, etc.) que se introduce con el agua de alimentación de la caldera y que es arrastrado hasta la parte inferior de la virola, donde, expuesto al calor, puede producir sobrecalentamiento.
2. El recubrimiento o fango (de los sedimentos del agua) se deposita en la parte inferior de la virola, restringiendo la transferencia térmica.
3. Una llama excesivamente localizada sobre una parte de la virola produce un calentamiento localizado.

13. ¿Cómo se efectúan los taladros según las exigencias de la normativa?

RESPUESTA: Deben hacerse a no más de 1/2″ (12,7 mm) menores que el diámetro de acabado y deben mecanizarse con herramientas mecánicas. A menudo se efectúan con un taladro piloto y una fresa de corte rotativo.

14. *a*) ¿Cuánto más grande que el tubo (de humos) debe ser un taladro de alojamiento?
b) ¿Cuánto mayor para un tubo de agua?

RESPUESTA:

a) 1/16″ mayor en diámetro (1,58 mm).
b) 1/32″ mayor (0,79 mm).

15. ¿Cómo deben trabajarse los finales de chapas y extremos de tubos para su asiento longitudinal?

RESPUESTA: Deben conformarse por laminado o prensado y no a golpes.

16. ¿Cuánto deben salir de la chapa los finales de los tirantes o roblones antes de proceder a su remachado?

RESPUESTA: No menos de dos roscas.

17. ¿Por qué el agua de alimentación no debería descargar en las cajas de agua?

RESPUESTA: La acción refrigeradora del agua contra las chapas calientes del hogar podría causar tensiones serias y daños probables.

18. ¿Para qué sirven las puertas de la caja de humos de las calderas de locomotora?

RESPUESTA: Inspección, limpieza y cambio de tubos de humos.

19. Cite cuatro tipos de construcción de puertas de hogar en una caldera de tubos vertical

RESPUESTA: Embridado y roblonada, embridado y soldada, ambas chapas embridadas y roblonadas (en boca de succión) y remachada con anillo de refuerzo.

20. ¿Cuáles son los cuatro tipos de caldera de tubos de humos verticales?

RESPUESTA: Chapa plana estándar, *Manning*, chapa perforada y cabezal sumergido.

21. ¿Cuáles son las razones o ventajas en las desviaciones del tipo normal estándar de los otros tipos citados en la pregunta número 20?

RESPUESTA: El cabezal sumergido frontal protege las partes superiores de los tubos del recalentamiento. El tipo *Manning* y el de chapa perforada permiten una mayor superficie de parrilla y un mayor volumen de hogar.

22. ¿Sobre qué norma de construcción se basa la presión máxima permisible en la caldera estándar de tubos verticales?

RESPUESTA: En la resistencia de la chapa u hogar; la que sea más débil, para resistir la rotura por presión interior o aplastamiento (colapso) del hogar por presión exterior a él.

23. ¿Qué método adicional se utiliza al calcular la presión máxima permisible de una caldera *Manning*?

RESPUESTA: Es necesario calcular la tensión de la chapa en su punto de mayor diámetro, entre la brida y la de los tirantes.

24. ¿La caldera económica es de hogar interior?

RESPUESTA: No. Su cámara de combustión es de acero, pero no forma parte de la zona presurizada de la caldera.

25. Cite cuatro calderas de hogar interior.

RESPUESTA: Vertical tubular, de locomotora, marina escocesa y escocesa de pared trasera seca.

26. ¿Cuándo se abre una junta de estanqueidad de una caldera, deberan volverse a usar los materiales de ella?

RESPUESTA: Las juntas de los agujeros de hombre y de mano no deberían volverse a usar cuando se montan de nuevo para volver a dar servicio en la caldera.

27. ¿Qué precauciones deberían tomarse antes de cerrar los agujeros de hombre de los calderines y puertas de estanqueidad de las calderas de vapor?

RESPUESTA: Asegurarse de que todas las herramientas, trapos y objetos similares extraños son retirados y que todo el personal que trabaje en el generador de vapor haya salido de la unidad.

28. Una caldera se instala en una planta industrial. ¿Por qué es necesario que un inspector autorizado por jurisdicción para ello haga una inspección de nuevo antes de que la caldera entre en funcionamiento?

RESPUESTA: La caldera es inspeccionada y comprobada hidráulicamente por un inspector autorizado; sin embargo, la instalación debe ser inspeccionada también por los requerimientos o servicios territoriales o estatales sobre: soporte de la caldera, tuberías, válvulas de seguridad de caldera, purgas, válvulas de corte y alimentación y conexiones, instrumentación y controles, así como seguridades de combustión que deben cumplir los requisitos de instalación jurisdiccionales.

29. ¿Cómo se comprueban los tirantes y arriostramientos para ver su solidez durante las inspecciones?

RESPUESTA: Todos los tirantes deberán comprobase para ver si están aún en tensión; las conexiones soldadas o roblonadas deberían comprobase para ver si hay grietas, desprendimientos de soldadura o signos de erosión o desgaste excesivo. Los tirantes o tensores se prueban normalmente al sonido, golpeando el terminal del tirante para comprobar si el sonido es el mismo en todos ellos. Un tirante agrietado o roto produce un sonido diferente.

30. ¿Cómo se comprueba la obstrucción de la circulación en una caldera pirotubular?

RESPUESTA: Hay que comprobar el sedimento y depósitos por encima de la parte superior de los tubos; puede deslizarse una pequeña linterna o lámpara bajándola entre los tubos para observar si los depósitos de óxidos están taponando el espacio entre los tubos o en las cajas de agua.

31. ¿Por qué debería un operador de calderas estar familiarizado con la operación manual en una caldera equipada con controles de combustión automáticos?

RESPUESTA: Las operaciones manuales deberían practicarse periódicamente para la eventualidad de que se puedan desarrollar condiciones de emergencia en los controles automáticos.

32. ¿Deberían ser las electroválvulas de combustible de las calderas automáticas del tipo de reenganche manual?

RESPUESTA: En calderas industriales es importante determinar por qué la válvula solenoide de combustible corta el combustible. Por ejemplo, podría ser por causa de una combustión deficiente que active el sistema de seguridad por célula detectora de presencia de llama. Por otra parte, la válvula solenoide de combustible debería ser del tipo de rearme manual para prevenir y evitar que se puedan desarrollar condiciones peligrosas de operación. Un operador puede y debe comprobar por qué se cortó el suministro de combustible.

33. Dos calderas de alta presión están conectadas a un calderín colector de vapor común. ¿Cuáles son los requerimientos normativos sobre las conexiones del calderín a cada caldera?

RESPUESTA: El código y la norma ANSI B31.1 (tuberías) pide que las calderas unidas a un calderín o tubería común de vapor estén conectadas mediante dos válvulas de corte que tengan un drenaje o purga libre entre ellas para comprobar la estanqueidad del cierre de la válvula. La primera válvula de corte próxima a la caldera debe ser una válvula antirretorno automática para evitar el retroceso o contra flujo. La segunda válvula debería ser del tipo de tornillo de rosca exterior y yugo, y si la salida del vapor es mayor de 2″ (50,8 mm) la válvula deberá ser del tipo de eje saliente.

34. Explique la diferencia entre una bolsa y una ampolla encontradas sobre la virola de una caldera pirotubular

RESPUESTA: Una bolsa es una deformación o bulto causado por un recalentamiento localizado de la virola y se extiende a través de todo el espesor de la chapa o virola. Una ampolla es una separación en la chapa que no se extiende a través de todo el espesor, pero es de naturaleza exfoliada, normalmente producida por impurezas que se introducen en el metal durante la operación de laminación.

35. ¿Por qué los agujeros de hombre y aberturas de servicio manual son normalmente de forma oval o elíptica?

RESPUESTA: Ello facilita la abertura de las tapas de la caldera en los períodos de mantenimiento e inspección. Las entradas de hombre proveen de una longitud extra para acceder al interior de la caldera sin hacer la abertura tan grandes que habría que quitar material extra, lo que a su vez requeriría un mayor refuerzo alrededor de las aberturas. El eje mayor de la aberturas de los agujeros de hombre siempre está colocado en pletina sobre la virola.

36. Al inspeccionar una caldera vieja de hogar interior y tubos de humos horizontales se encuentra que la caldera tiene tres tensores a un lado del agujero de hombre superior y cuatro tensores al lado opuesto. ¿Debe reducirse la presión de trabajo?

RESPUESTA: Esta situación debería llamar la atención del inspector de jurisdicción. Él determinará la presión admisible comprobando la carga y luz o paso entre tensores que son precisos para soportar la carga y la luz permisible, y que no se necesite hacer nada más. Si se necesitan cuatro tensores en cada lado, habrá que instalar un tensor adicional o reducir la presión.

37. Un tensor macizo de 8″ (200 mm), ¿qué tipo de taladro requiere en la chapa de virola y qué distancia debe sobresalir de ella?

RESPUESTA: Según los requisitos del Código, el taladro debe ser, al menos, de 3/16″ (4,76 mm) mayor en diámetro y debe sobresalir 1/2″ (12,7 mm) por encima de la superficie de la chapa que está siendo arriostrada.

38. ¿Cómo afecta la longitud del hogar a sus tensiones?

RESPUESTA: La longitud incrementa el momento flector que el hogar debe soportar cara al aplastamiento o colapso. Ésta es la razón para arriostrar el hogar, instalando por ejemplo un anillo Adamson en toda su longitud.

39. ¿Cuál es la distorsión máxima permisible por el Código en el diámetro de una virola de caldera o calderín soldado?

RESPUESTA: 1 por 100 del diámetro medio.

40. ¿Está permitido situar un taladro para tubo en una junta soldada?

RESPUESTA: Por el código americano, es permisible; sin embargo, la soldadura después del tarado debe comprobarse para ver si hay grietas por medio de una inspección magnética de partículas para estar seguro de que no está afectada.

41. ¿Bajo qué condiciones pueden soldarse las riostras o tirantes según normativa?

RESPUESTA: La junta o unión debe prepararse según el Código, y el procedimiento de soldadura y soldado debe cumplir los requisitos del Código.

42. ¿Cuál es el espesor mínimo que debe cumplir una chapa de acero de virola y de tubo de humos de caldera pirotubular en una caldera de 60″ de diámetro interior (152,4 mm)?

RESPUESTA: Según el Código, 3/8″ para la virola (9,53 mm) y 1/2″ (12,7 mm) para la chapa de tubos de humos*.

43. ¿En qué tipo de caldera encontraría usted un hogar Adamson, y según el Código cuál es la menor sección longitudinal y el espesor de un hogar Adamson?

RESPUESTA: En la caldera SM; 18″ de longitud (457,2 m); espesor: 5/16″ (7,98 mm) (según la Sección I, parte PFT).

44. Una caldera de hogar interior con fondo de hogar húmedo va a instalarse en una sala de calderas. ¿Qué distancia mínima se requiere entre la parte inferior de la virola y el suelo?

RESPUESTA: Una distancia de 12″ (305 mm) se requiere para que el fondo de la virola sea accesible sobre el suelo para inspección y/o reparación.

45. Un nivel de vidrio en una caldera horizontal de tubos de humos muestra el nivel mínimo posible de agua en el vidrio. ¿Cuántos milímetros por encima de los tubos debería estar este nivel según el Código?

RESPUESTA: El Código exige que el agua esté 3″ (76,2 mm) por encima de los tubos cuando el agua en el vidrio está a su mínimo nivel visible.

---

* Según la normativa española:
$e = P\varnothing/2\sigma + 1{,}5 \text{ mm} = 16 \text{ kg/cm} \times 152 \text{ cm}/2 \times 1.500 \text{ kg/cm} + 1{,}5 \text{ mm} = 9{,}6 \text{ mm} \simeq 10 \text{ mm}.$

46. El Código no permite soldaduras en las chapas de una caldera de tubos de humos que estén en contacto con los gases primarios del hogar. Defina gases primarios de hogar.

RESPUESTA: Los gases primarios de hogar son aquellos que están en la zona de fuego donde la temperatura excede los 850 °F (454 °C).

47. Para una caldera pirotubular, por normativa, ¿cuál es el menor tamaño de fusible y puertas de acceso?

RESPUESTA: Los fusibles deben ser, al menos, de $1\frac{1}{2}''$ (38 mm) y las puertas de acceso deben tener un área mínima representada por un rectángulo de 12″ × 16″ (305 mm × × 406,4 mm), siendo 11″ (279,4 mm) la dimensión mínima permitida.

48. ¿Por qué se utilizan domos en las calderas de locomotora?

RESPUESTA: Para suministrar vapor más seco y también proveer de espacio adicional de almacenamiento de vapor para utilizarlo durante las etapas de subida o ascenso del tren.

49. *a*) ¿Por qué no se queman las partes superiores de los tubos en las calderas verticales que no están cubiertas con agua?
b) ¿Por qué las partes finales de los tubos en una caldera de alta temperatura tienen pérdidas en caso de bajo nivel de agua?

RESPUESTA:

a) Porque los productos de combustión en este punto están a una temperatura tal que la refrigeración de los finales de tubo viene dada por el vapor y evita que se quemen los finales superiores.
b) Los productos de la combustión en la chapa final de tubos están a mucha menor temperatura que en la chapa delantera, de forma que cuando sucede un bajón del nivel de agua, los tubos se recalientan y dilatan; al mismo tiempo, la chapa delantera se recalienta y el alojamiento del tubo se dilata y se hace más grande, de forma que el asiento del tubo producido por la dilatación, se destruye y de ese modo tiene lugar la fuga en los finales delanteros.

50. ¿Qué tipo de caldera, pirotubular o de tubos de agua, tiene mayor superficie de calefacción en los tubos?

RESPUESTA: El Código establece que la superficie de calefacción debe computarse por aquel lado de la superficie de caldera expuesta a los productos de la combustión. Además, un tubo de agua contiene mayor superficie de calefacción que un tubo de humo del mismo diámetro.

51. ¿Cuándo es preciso un agujero de hombre en la chapa frontal de tubos bajo los tubos en una caldera HR?

RESPUESTA: Cuando la caldera es de 48″ (1.219 mm) de diámetro o mayor.

52. ¿Cuándo se requiere un agujero de entrada de hombre por encima de los tubos de humos de una caldera pirotubular horizontal?

RESPUESTA: Si es de hogar exterior, para calderas de 40″ (1.016 mm) de diámetro o mayor; si son de hogar interior, para calderas de 48″ (1.220 mm) de diámetro o mayores.

53. *a*) ¿Cuál es la anchura mínima de una brida de agujero de hombre para una superficie de acoplamiento y cierre?
b) ¿Qué puede hacerse si la brida fuera sólo de 7/16″ (11,11 mm) de espesor?

RESPUESTA:

a) 11/16″ (17,46 mm).
b) Puede adaptarse un anillo de acero sobre la brida por contracción y la doble cara puede ser mecanizada como superficie de soporte.

54. Cite cuatro medios de soportar un hogar circular sometido a presión exterior.

RESPUESTA: Puede ser: 1) autoportante; 2) atirantado; 3) ondulado (corrugados); o 4) equipado con anillos Adamson.

55. ¿Cuál es la longitud máxima permitida de paso en una caldera pirotubular de tubos de humos y retorno horizontal, de construcción roblonada?

RESPUESTA: 12 pies (3,66 m).

56. ¿Cuáles son las ventajas de la chapa superior de tubos sumergida en una caldera vertical?

RESPUESTA: Una chapa superior de tubos sumergida en caldera vertical protege la parte superior de los tubos y los finales de éstos del recalentamiento y posibles grietas por la misma causa.

57. ¿Qué limitaciones de tamaño no deben excederse para que una caldera pirotubular sea clasificada como caldera miniatura?

RESPUESTA: Diámetro interior: 16″ (406,4 mm); volumen bruto: 5 ft^3 (0,1415 m^3 = = 1.415 litros); superficie calefactora: 20 ft^2 (1,86 m^2); presión de trabajo permisible: 100 psi (7 kg/cm^2).

58. Cite tres ventajas por utilizar hogar ondulado (corrugado) en una caldera de hogar interior (SM).

RESPUESTA: El tipo de hogar interior ondulado ofrece las siguientes ventajas sobre un hogar plano: 1) las ondulaciones arriostran el hogar de forma que no se aplaste tan fácilmente bajo la acción de la presión interior, como uno similar del mismo espesor pero liso y mucho menos que uno plano; 2) el hogar ondulado permite soportar más dilatación y contracción como efecto de la acción acordeón de las ondulaciones; y 3) hay un ligero incremento en la transmisión térmica respecto a un hogar plano del mismo diámetro y longitud.

59. ¿Cómo puede comprobarse el nivel de agua en una caldera de vapor si el nivel de vidrio está temporalmente fuera de servicio?

RESPUESTA: Utilizando los grifos de prueba que están situados en la columna del nivel de agua.

60. ¿Qué consideraciones de espacio se requieren cuando se instalan calderas horizontales de tubos de humos?

RESPUESTA: Debe dejarse suficiente espacio en el frente o en la trasera de la caldera de forma que se puedan reemplazar los tubos de humos.

61. ¿Por qué exige el Código de calderas que las calderas HRT de más de 72″ (1.829 mm) de diámetro sean soportadas por algún tipo de asiento y suspensión exterior?

RESPUESTA: Los apoyos de obra que se utilizan en las calderas pequeñas de hogar interior no pueden soportar la carga más pesada que una caldera llena de agua impondría a los ladrillos y cimientos, y podría producirse la rotura o desmoronamiento de los soportes de obra.

62. ¿Qué es un contrafuerte?

RESPUESTA: Es una barra atornillada a las chapas planas de soporte de tubos para evitar que la chapa pandee cuando los tirantes se ponen en tensión antes de instalar los tubos de humos.

63. Al inspeccionar una caldera horizontal de tubos de humos, ¿cuál es la diferencia entre un tirante y una riostra transversal? ¿Dónde se utiliza cada uno? ¿Por qué?

RESPUESTA: El tirante tiene tuercas y arandelas en cada extremo. La riostra transversal tiene tuercas y arandelas en un extremo; el otro extremo está forjado en un ojal o base libre de la zona de cabeza mediante una clavija, tuerca u otro tipo de construcción. Las riostras transversales pueden usarse por encima de los tubos y para que las tuercas estén protegidas de la combustión por la chapa bóveda.

Las riostras transversales se utilizan por debajo de los tubos de humos allí donde los extremos deben protegerse de las altas temperaturas de los gases.

64. Una caldera de locomotora está para exhibición en una feria estatal y requiere aprobación para operar.

a) ¿Cuáles son las chapas de una caldera de locomotora?

RESPUESTA: Virola, chapa de tubos de la caja de humos, chapa del domo, cabezal del domo, chapa envolvente, chapa transversal, chapas colaterales de la caja de humos, chapa de los tubos de humos, chapa bóveda, chapa interior de la puerta del hogar y chapa exterior la misma.

b) ¿Cuál es la zona de más peligro de la caldera en caso de bajo nivel de agua?

RESPUESTA: La chapa bóveda.

c) ¿De qué lado o final se retiran y reemplazan los tubos de humos?

RESPUESTA: De la parte final de la caja o cajón de humos.

d) ¿Cómo se soportan las chapas del hogar?

RESPUESTA: El lateral, puerta y chapas transversales se soportan por riostras. La chapa deberá ser soportada por tensores radiales o tirantes y virotillos.

e) ¿Cuál es la colocación normal del agujero de entrada de hombre?

RESPUESTA: En el domo o en la chapa superior si no hay domo.

f) ¿Cuántos agujeros de entrada de hombre se usan en una caldera de locomotora? Explique su respuesta.

RESPUESTA: Uno. La parte de la virola sobre los tubos es la única zona del interior que es accesible.

g) ¿Cuál sería el nivel mínimo para la tuerca inferior del nivel de vidrio?

RESPUESTA: La parte visible más baja del vidrio debería estar, al menos, a 3″ (76,2 mm) encima de la parte más elevada de la chapa bóveda.

65. ¿Para qué tamaño de caldera pirotubular se debe aplicar el código ASME CSD-1 titulado «controles y dispositivos de seguridad para calderas automáticas»?

RESPUESTA: Ésta es también una norma ANSI y puede ser requerida para adopción de jurisdicción en toda instalación de calderas automáticas de potencias térmicas de entrada de combustible entre 400.000 hasta 12.500.000 BTU/hora (de 100.800 a 3.150.000 kcal/hora). Véanse posteriormente los capítulos relativos a combustibles, combustión y controles.

Capítulo 3

CALDERAS DE TUBOS DE AGUA

La diferencia fundamental entre las calderas de tubos de agua y las de tubos de humos es que en las primeras el agua circula por dentro de los tubos en vez de alrededor de ellos (calderas de tubos de humos). Los gases calientes pasan alrededor de los tubos en las primeras.

Las calderas de tubos de fuego (o de humos) se diseñan con los tubos contenidos dentro de la envolvente o cáscara de la caldera. Los tubos de la mayor parte de las calderas de tubos de agua están situados en el exterior del calderín (o calderines) de vapor. Las dos ventajas de la modalidad de caldera de tubos de agua son:

1. Puede obtenerse mayor capacidad aumentando el número de tubos, independientemente del diámetro del calderín de vapor.
2. El calderín no está expuesto al calor radiante de la llama.

La mayor ventaja sobre las calderas de tubos de humos (o calderas pirotubulares) es la libertad para incrementar las capacidades y presiones. Esto es imposible con las calderas de tubos de humos ya que el espesor de la chapa exterior delimitante de la caldera y otros requisitos estructurales pueden hacerlas prohibitivas por encima de las 21 toneladas/hora de capacidad y por encima de los 21 kg/cm^2 de presión de vapor. Las elevadas capacidades y presiones de las calderas de tubos de agua han hecho posible los modernos generadores de vapor grandes de las centrales térmicas.

La construcción modular de grandes calderas de tubos de agua permite el montaje en fábrica de los paneles de tubos de agua del hogar y de los paneles del sobrecalentador y recalentadores que se sitúan en obra y después se conectan a los calderines o cabezales. Esto facilita el montaje en obra mediante grúa y, después de situados, se conectan los muros o paneles pantalla a los calderines de vapor. Esto facilita el montaje, da mayor control de calidad en fabricación y es más económico. Sin embargo, las pequeñas calderas compactas de tubos de agua también se diseñan y desarrollan para competir con las calderas de tubos de humo, y para cubrir el gran mercado existente para las calderas más pequeñas. Las ventajas son las siguientes:

1. Al instalar múltiples unidades en lugar de una sola caldera grande, el calentamiento se basa en la carga por caldera, suministrando una gran elasticidad

durante los períodos de demanda baja de vapor. Las calderas producen vapor rápidamente; por otra parte, es posible el corte de fin de semana sin verse afectados por los elevados costes de calentamiento de una caldera grande.
2. Los pequeños generadores de vapor pueden colocarse cerca de la carga de vapor, evitando así las pérdidas de las líneas de vapor y condensado y reduciendo el tamaño de la sala de calderas y el espacio necesario.
3. La capacidad de reserva o punta puede suministrarse con un sistema de calderas múltiples.

ANTIGUAS CALDERAS DE TUBOS DE AGUA, TIPO DE TUBOS RECTOS

Las primitivas calderas de tubos de agua siguieron los diseños de algunas calderas de tubos de humos siendo de tubos rectos suspendidos sobre el hogar y con los tubos conectados en dos tipos de cabezales:

1. Cabezal tipo caja.
2. Cabezal sinuoso.

Calderas de cabezales sinuoso y de caja.

La Figura 3.1*a* muestra una antigua caldera de tubos de agua rectos. Los tubos están colocados en el hogar, y el calderín superior se utiliza en principio como depósito de almacenaje de agua y vapor. La circulación desde el calderín superior es hacia abajo y a los cabezales traseros, y desde éstos atravesando los tubos de agua y pasando finalmente a través del cabezal frontal. Con esta exposición, los tubos de las calderas comienzan a estar separados de la «cáscara» o pared interior, en contraste con las calderas de tubos de humos. El diseño mostrado tiene un calderín: las grandes calderas tienen dos o tres calderines. El calderín opera desde el frontal hasta la parte

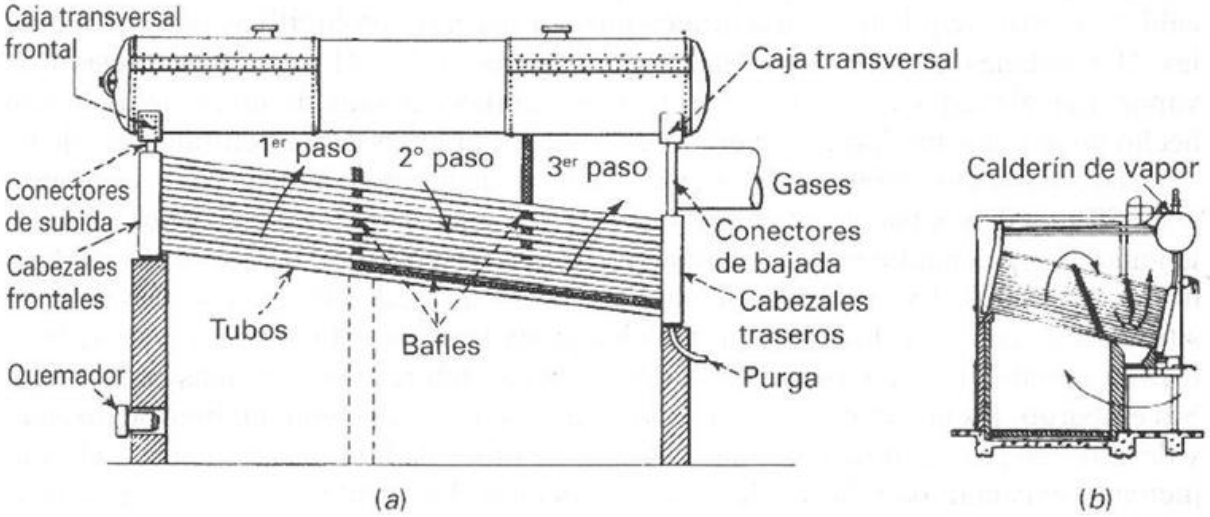


Figura 3.1. Antiguas calderas de tubos de agua rectos. (*a*) Tipo de calderín longitudinal. (*b*) Tipo de calderín transversal.

trasera de la caldera. Los tubos rectos de acero inclinados, y normalmente de 4″ (100 mm) de diámetro exterior, están conectados con el calderín por cabezales de acero estampado de tipo seccional, estando los tubos colocados por parejas. Un calderín de lodos debajo de los cabezales traseros es utilizado para recoger los sedimentos y es purgado de tiempo en tiempo. Los cabezales de tubos son de una pieza para cada fila vertical de tubos. Los orificios de manipulación (para limpieza de los tubos) están cerrados por tapas atornilladas, con juntas hechas a máquina.

El cabezal por secciones, que también se conoce como sinuoso, o *cabezal serpentín* (véase la Figura 3.2*a* de la página siguiente), es de fundición o forjado. En las viejas calderas de baja presión, los cabezales se construyeron también de hierro fundido. Pero para alta presión, fueron limitados por el código ASME a una presión máxima de 160 psi (11,2 bar) y 350 °F (177 °C). En contraste, los cabezales construidos de acero forjado han sido utilizados para presiones de hasta 1200 psi (84 bar).

Una *caja o cabezal frontal* (Fig. 3.2*b*) está construida de chapas planas, referenciadas como chapa de tubos y chapa de cierre de tubo. Estas chapas deben arriostrarse para evitar el combado o deformación. Los laterales, parte superior e inferior están solapadas y roblonadas (soldados en las calderas modernas) a las chapas de tubos y de cierres de tubo. El atirantado (o arriostrado) de estas chapas limita la presión de trabajo para una caja o cabezal hasta aproximadamente 600 psi (40 bar).

Calderas de calderín transversal. Las calderas de tubos de agua de calderín transversal fueron construidas bien con cajas sinuosas o caja-cabezal en los tipos de calderín transversal (véase la Figura 3.1*b*). Los cabezales delanteros se suministran con la entrada de agua mediante una fila de conectores o bajantes conectados a la parte inferior del calderín transversal. Estos tubos conectores son normalmente del mismo diámetro que los tubos de generación (de vapor). Los finales superiores del frente de los cabezales están conectados al lado frontal del calderín transversal mediante una o más filas de tubos de circulación horizontales que llevan una mezcla de vapor y agua (entregada a los cabezales o cajas frontales por los tubos de generación) al calderín.

Ambos tipos de calderas, de caja sinuosa y de tipo cabezal, tienen tapas de tubos, que son una fuente de pérdidas principal si las juntas o sellos de las tapas no se mantienen bien estancas. Sobre la caldera de cabezal sinuoso puede tener lugar la corrosión sobre la chapa de entrada exterior del tubo como resultado de fugas por los agujeros de limpieza y sus tapas. Las pérdidas y corrosión también tienen lugar entre los cabezales sinuosos, que normalmente van con junta de amianto o asbesto. En las calderas de cajas y cabezales, las pérdidas o fugas en las placas de agujeros de limpieza producen corrosión sobre la envolvente o chapa exterior donde se sitúan las tapas. La fuga de estos agujeros de mano encuentra su camino bajante hacia la parte inferior de los cabezales (Fig. 3.2*d*) que normalmente están ocultas o revestidas por obra de albañilería (ladrillos). Así, la fuga desde arriba produce una corrosión indetectable. Cuando se inspeccionan calderas de cajas que llevan obra de albañilería en los cabezales interiores, siempre debe tirarse la obra de ladrillos y comprobar las superficies metálicas ocultas para detectar la corrosión.

Algunos de los fabricantes americanos que fabrican calderas de tubos de agua del tipo de cabezales y cajas de agua son: Heine, Union Boiler, Murray Boiler, E. Keeler Co., Springfield Boiler Co., Babcock & Wilcox Co., y la Wickers Boiler Co.

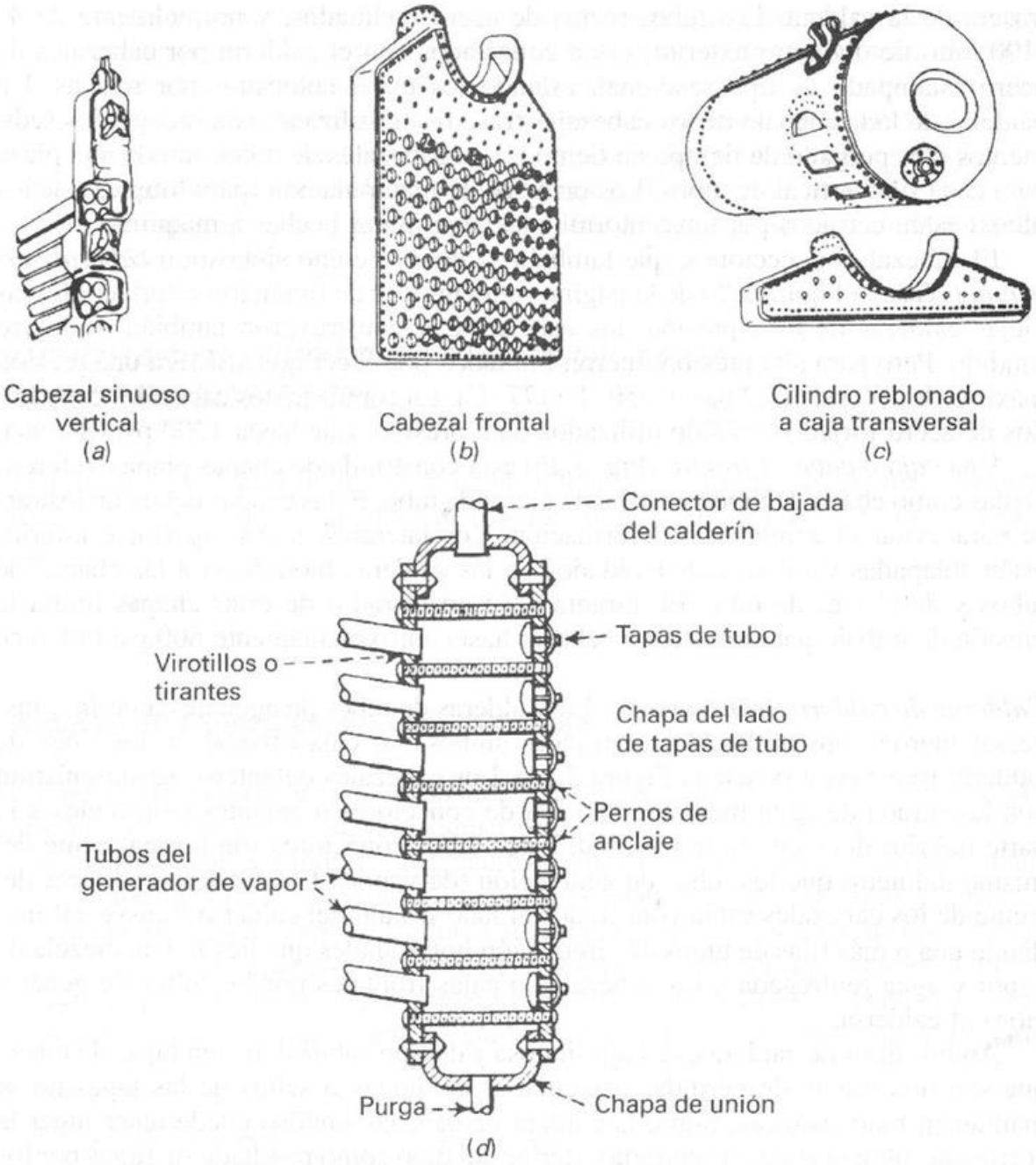


Figura 3.2. Las cajas o cabezales fueron utilizados en calderas de tubos de agua rectos. (*a*) Caja sinuosa (o en «ese»). (*b*) Caja frontal. (*c*) Caja transversal y conexión del cilindro a la caja o cabezal. (*d*) Detalle de caja o cabezal.

Calderas de tubos de agua verticales, tipo de tubos rectos

La caldera de tubos de agua verticales es un tipo de caldera que requiere un moderado espacio volumétrico y una superficie en planta, por unidad de capacidad, pequeña. La caldera de tubos de agua de la Figura 3.3*a* representa este tipo. Estas calderas utilizan un hogar holandés o extensión de la cámara de combustión para asegurar un espacio adecuado de combustión. Algunas instalaciones usan la fila frontal de tubos

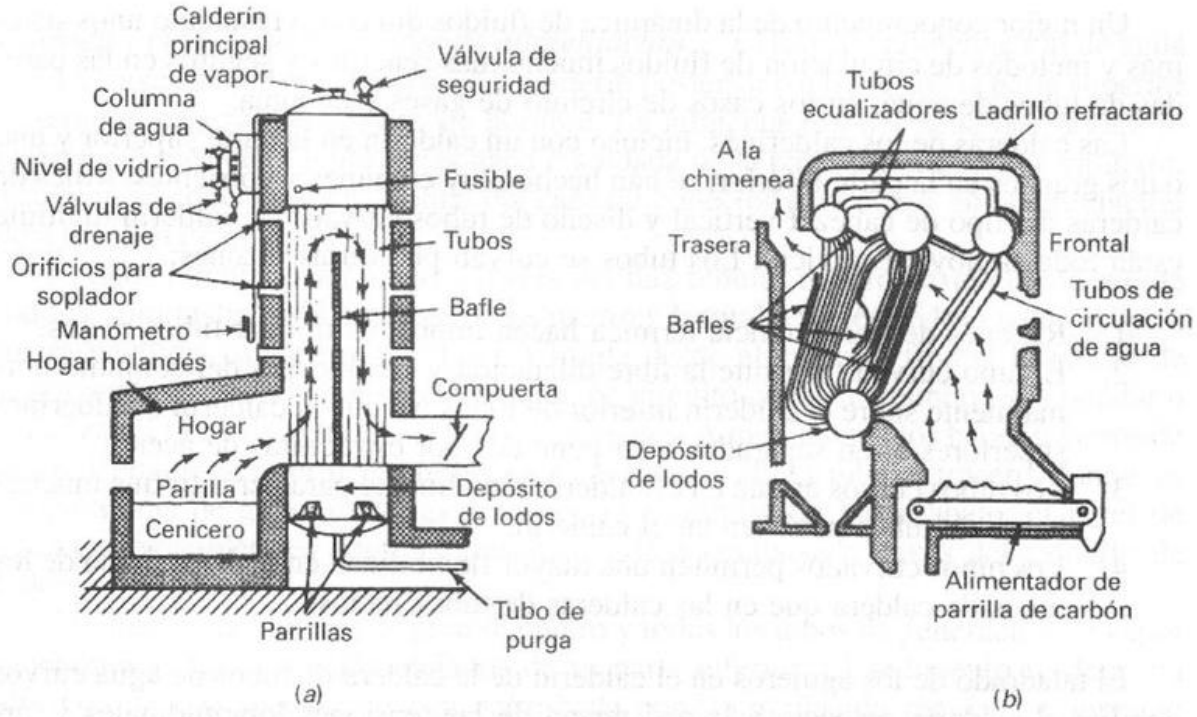


Figura 3.3. (*a*) Caldera vertical de tubos de agua y detalles. (*b*) Antigua caldera de tubos curvados del tipo Stirling.

generadores para formar una pared o muro de agua superior o de techo en la prolongación del hogar.

El calderín superior se conoce como calderín de vapor; el inferior como calderín de lodos. Las placas tubulares están arriostradas por tirantes o virotillos de sección y paso adecuados. El cabezal opuesto a la chapa de tubos es el calderín de vapor y en el calderín de lodos no se necesita arriostrado, porque está diseñado con el radio adecuado para soportar la presión de diseño (trabajo).

El cambio de tubos puede realizarse por inserción a través de una salida en circunferencia de agujeros de mano colocados en el cabezal superior del calderín de vapor para este propósito. El acceso a estos calderines se efectúa a través de un agujero de hombre en la cabeza bombeada de cada calderín.

CALDERAS DE TUBOS DE AGUA CURVADOS

Los tubos curvados son más flexibles que los rectos. Pueden construirse calderas anchas y bajas allí donde la altura de sala de calderas es limitada, o estrechas y altas donde el suelo de planta es escaso o caro. También las calderas de tubos curvos permiten que una mayor superficie de calefacción esté expuesta al calor radiante de la llama. Los calderines sirven de puntos colectores muy convenientes en el circuito agua-vapor y como separación del vapor y del agua. Así se han utilizado calderas con dos, tres y a veces hasta cuatro calderines. A medida que las calderas aumentan de tamaño (lo que es posible con el diseño de tubos curvos), se incrementa la demanda de un hogar refrigerado más activo. Así se hicieron las paredes o pantallas de tubos de agua y otras mejoras de diseño.

Un mejor conocimiento de la dinámica de fluidos dio como resultado unos sistemas y métodos de circulación de fluidos mucho más sencillos y seguros en las paredes de tubos de agua, en los casos de circuito de gases y de agua.

Las calderas de los calderines, incluso con un calderín en la parte superior y uno o dos grandes en la parte inferior, se han hecho muy comunes y corrientes. Miles de calderas del tipo de cabezal vertical y diseño de tubos curvados y calderín múltiple están todavía hoy en servicio. Los tubos se curvan por varias razones:

1. Razones de transferencia térmica hacen imposible utilizar tubos rectos.
2. El tubo curvado permite la libre dilatación y contracción del conjunto normalmente sobre el calderín inferior de lodos, ya que el calderín o calderines superiores están separados o suspendidos por estructuras de acero.
3. Los tubos curvos entran en el calderín radialmente para permitir que muchos haces de tubos penetren en el calderín.
4. Los tubos curvados permiten una mayor flexibilidad en la disposición de los tubos de caldera que en las calderas de tubos rectos.

El taladrado de los agujeros en el calderín de la caldera de tubos de agua curvos debilita el calderín respecto a la resistencia de las tensiones longitudinales y circunferenciales. Esto se trata en el código ASME de calderas asignando un rendimiento de unión a la disposición del agujero del tubo al calcular la presión máxima permisible para el acero de la chapa o «cáscara» del calderín. La parte de la «cáscara» del calderín que tiene los agujeros de los tubos se refiere también a la chapa de los tubos, siguiendo la designación de los tubos de fuego (o de humos). Los cálculos de la eficiencia de la soldadura y de la presión admisible en la chapas y calderín se estudian en los últimos capítulos. Generalmente, la sección de la chapa de tubos de un calderín se hace de mayor espesor para reforzar la chapa del calderín y compensar las perforaciones o taladrado de los tubos.

Calderas *Stirling*

La caldera *Stirling* fue uno de los primeros tipos de calderas de tubos curvados de utilización común. La Figura 3.3*b* muestra una unidad con bancadas de caldera frontales y medias conectadas a ambos calderines frontal y medio superior. Esta disposición iguala la descarga de la mezcla de vapor-agua para aumentar la circulación y reducir los arrastres del vapor. Las calderas de este tipo general fueron diseñadas normalmente para presiones desde 11 hasta 70 bar y un rango de producción de 3,5 a 157,5 toneladas/hora de vapor. Ambos calderines, el superior y el inferior, tienen protección parcial de obra de refractario alrededor de ellos. Como el Código de calderas requiere (o requirió) que la junta longitudinal del calderín esté fuera del efecto de la zona térmica del hogar o caja de fuego, la junta está normalmente protegida por debajo de este refractario. Incluso si ello significa picar y descubrir lo que esté debajo del refractario, compruebe siempre las condiciones de las juntas soldadas o remachadas longitudinales y circunferenciales buscando grietas, y revise por si hubiese fragilidad cáustica que afectase a los calderines.

Entrada y circulación del agua de alimentación. El tubo de alimentación de agua entra a través de la parte superior del calderín posterior o a través de la parte superior trasera del cabezal de agujero de hombre. La alimentación del agua descarga a lo largo y a través de la junta remachada o soldada de la parte trasera de este calderín. También se conecta por el frontal del cabezal conector para entrar en la circulación de agua de la caldera.

El agua circula hacia abajo a través del haz tubular trasero hasta el calderín de lodos y suministra a los haces de tubos medio y frontal a través de los cuales alcanza los respectivos calderines de vapor. Circula desde el calderín frontal al medio de vapor a través de los tubos de circulación en circuito corto, tendiendo así a igualar o ecualizar el nivel de agua en estos dos calderines. A medida que los haces traseros de tubos del calderín intermedio retroceden para unirse al haz tubular trasero, donde las temperaturas de gases menores permiten una circulación hacia abajo, el nivel de agua en los calderines medio y trasero tiende a igualarse a través del calderín de lodos.

El calderín de lodos es de gran diámetro y todos los tubos de generación de vapor montantes y bajantes están alejados de su parte inferior. El sedimento se deposita allí, porque esta sección no está perturbada por la circulación rápida. La purga se conecta mediante un accesorio forjado de acero remachado o soldado a la parte inferior del calderín de lodos. En el caso de calderas grandes con calderines de lodos grandes, puede suministrarse más de una purga.

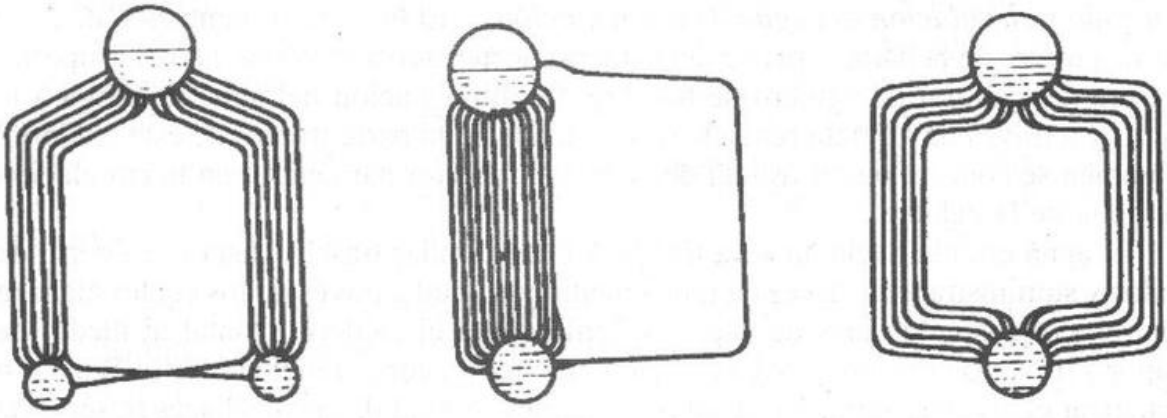
Los *bafles* se utilizan mucho en las calderas de tubos curvados, como se muestra en la Figura 3.3*b*. Éstos requieren inspección para estar seguros de que están todavía en funcionamiento para evitar las elevadas temperaturas en otras secciones de paso de gases. Esto puede causar problemas de circulación y sobrecalentamiento en las secciones tubulares.

Calderas modernas de tubos curvados

Las calderas compactas modernas han crecido en popularidad y tamaño para las aplicaciones industriales. Hoy en día, la mayoría de las calderas de tubos de agua siguen uno de los tres diseños mostrados en la Figura 3.4 de la página siguiente. Estos se conocen como tipos A, D y O.

Una caldera de tubos de agua del tipo D montada en fábrica consta de dos calderines y viene equipada con un quemador de atomización por aire a baja presión. Las paredes del hogar están refrigeradas por agua en las partes frontal y trasera, y las paredes exteriores, suelo y techo están refrigeradas por tubos tangentes. La caldera puede estar equipada con salidas bien superiores o laterales de gases o humos. Tanto la «cubierta» como la envoltura están construidas de acero galga 10. La «cáscara» o envoltura principal está totalmente soldada y sellada (y comprobada a presión) en fábrica. La «cáscara» o envoltura exterior pesada en galga 10 soldada y sellada es adecuada para su instalación exterior. Las paredes interiores del hogar están hechas de tubos tangentes. Véase la Figura 3.5 de la página siguiente.

Las calderas compactas de tubos de agua normalmente están equipadas con equipos de encendido y seguridad de combustión y equipos de fallo de llama y encendido. Ambos, el quemador piloto y el principal, están monitorizados por un



(*a*) Tipo A (*b*) Tipo D (*b*) Tipo O

Figura 3.4. Las calderas compactas modernas se disponen en tres configuraciones: A, D y O.

detector de llama sensible a la radiación de la llama (véanse los capítulos posteriores). Las características de corte por seguridad, interconexión de seguridad y llama de operación principal se suministran por la mayoría de los fabricantes. Las alarmas y conexiones eléctricas se incluyen, por bajo nivel de agua, alta presión de vapor, fallo del ventilador, temperatura baja y presión de combustible para unidades que queman combustibles líquidos y alta y baja presión de gas para las que queman gas natural y dispositivos de fallo de llama para ambos combustibles.

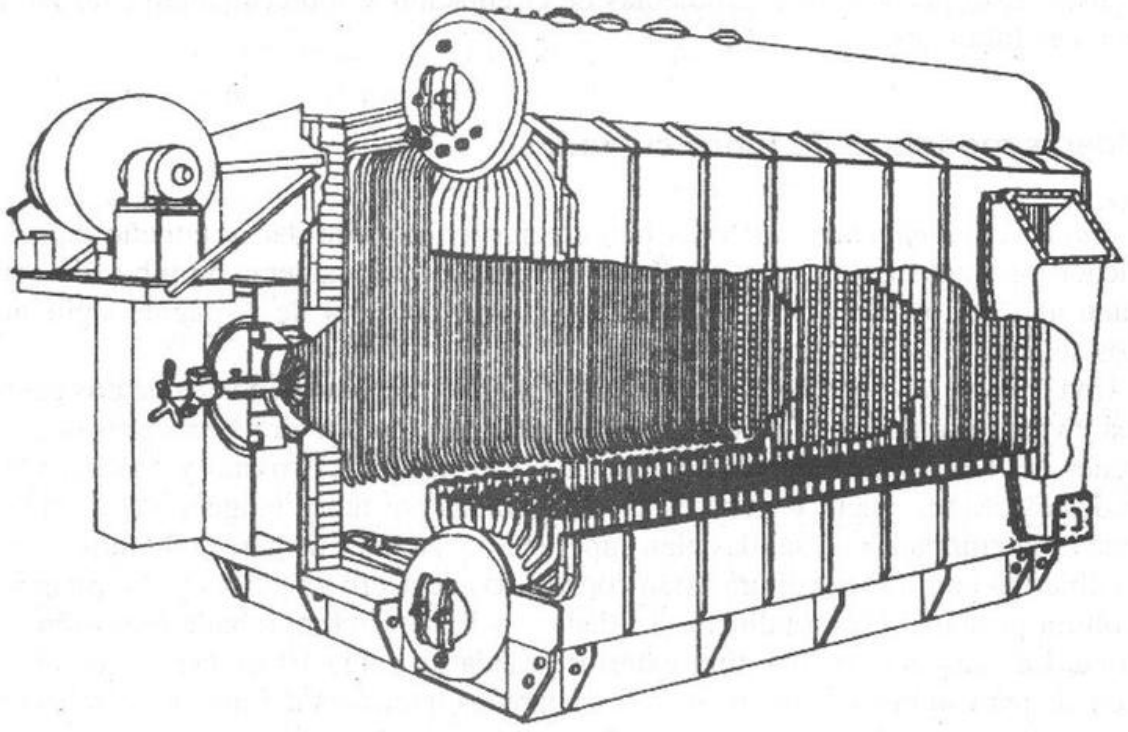


Figura 3.5. Caldera tipo D de dos calderines y tubos curvados, equipada para quemar gas o gasoil con hogar refrigerado de tubos de agua. (*Cortesía de Combustion Engineering, Inc.*)

Calderas compactas de combustible sólido (carbón). Las calderas de tubos de agua alimentadas con carbón generalmente se fabrican de hasta alrededor de 113 toneladas/hora de producción de vapor. Por encima de esta tasa se usan unidades de carbón pulverizado y hogares ciclónicos. Las calderas modernas de parrilla son normalmente del tipo de dos calderines. Se utilizan los diseños de calderín ancho y calderín transversal con la caldera de tubos de agua curvados. Sobre una caldera de calderín largo, los gases fluyen a lo largo de los calderines, mientras sobre una de calderín transversal, los humos fluyen a través o perpendicularmente a los calderines. La Figura 3.6 es un dibujo de un generador de vapor de 500 HP calentado por un hogar inferior de retorta simple de diseño patentado por E. Keeler Co.

CALDERAS DE COMBUSTIÓN MIXTA (COMBINADA)

Las calderas que queman una combinación de combustibles, como la que se muestra en la Figura 3.7 de la página siguiente, requieren unas condiciones especiales. Entre éstas están las siguientes. Cuando se añade combustible líquido y/o gaseoso a una caldera de combustible sólido, hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

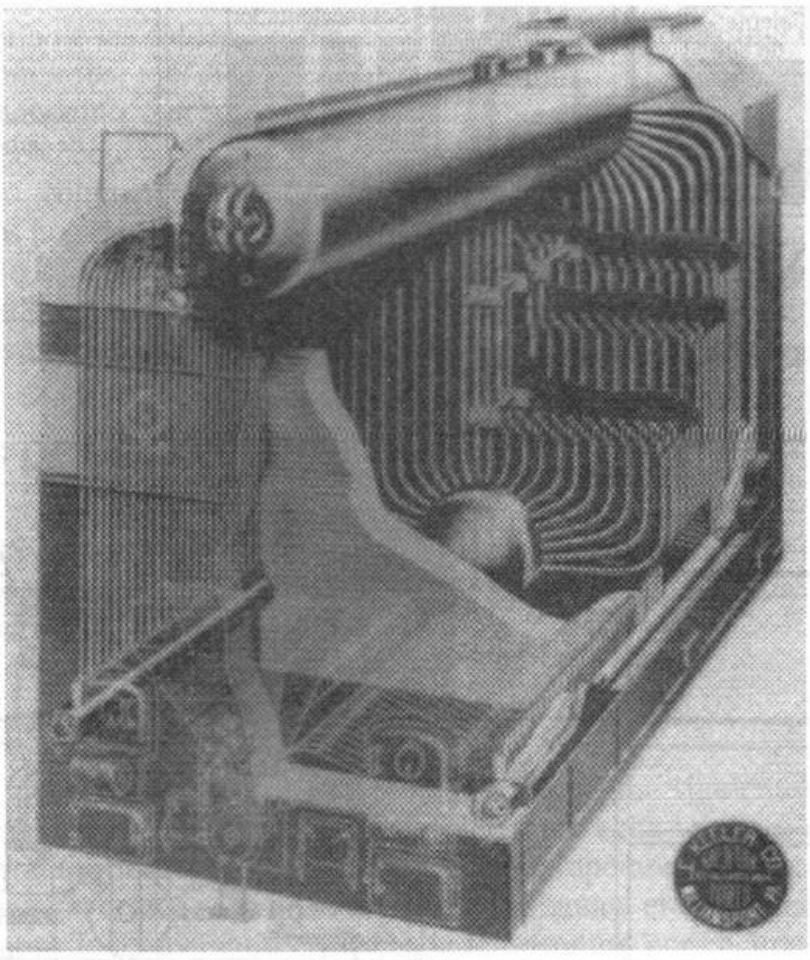


Figura 3.6. Un calderín grande en la parte superior y otro pequeño en la inferior es una característica peculiar del generador de vapor de 500 HP calentado por hogar inferior. (*Cortesía de E. Keeler Co.*)

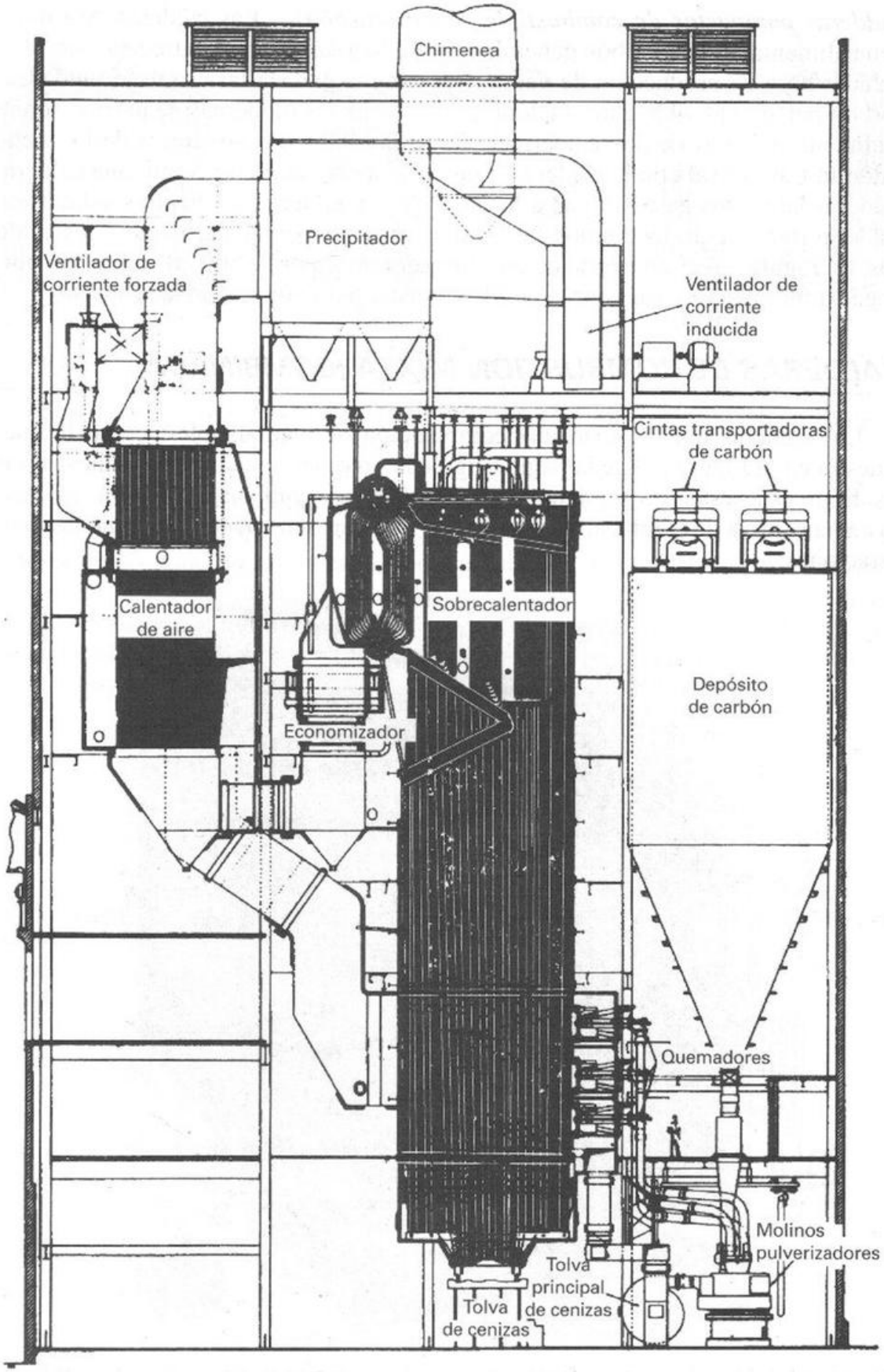


Figura 3.7. Las calderas preparadas para quemar fuel, gas y carbón pulverizado deben ser diseñadas al efecto. (*Cortesía de Babcock & Wilcox Co.*)

1. Utilizar recalentador y atemperador.
2. Necesidades de exceso de aire.
3. Normativa de emisiones de NO_x a observar.
4. El espacio que los tubos necesitan para evitar el ensuciamiento y restricciones en el tiro.
5. Temperaturas esperadas del metal del precalentador de aire.
6. Temperaturas finales de los gases que deben obtenerse.

Cuando se quema un combustible sólido sobre una parrilla, el aire refrigerador debe suministrarse para las piezas del quemador de combustible sólido o gaseoso para disipar y transportar el calor desprendido por radiación desde el interior del hogar. Esto puede afectar al rendimiento por quemar con exceso de aire. Cuando se quema combustible líquido o gas en quemadores de muro frontal, se requiere un caudal de aire refrigerador a través de las parrillas para evitar el calentamiento excesivo. Por esta razón, es prudente consultar con el fabricante original de la caldera para obtener recomendaciones de diseño cuando se está considerando convertir una caldera para poder quemar varios combustibles.

Cambios de combustibles

Como la mayoría de las calderas están diseñadas para un combustible determinado, es necesario comprobar con el fabricante de la caldera cuando se considere la operación o funcionamiento con algún otro combustible. Algunos de los factores que deben tenerse en cuenta son la cantidad de aire de combustión necesario, tamaños de los ventiladores, volumen de la cámara de combustión para obtener una combustión completa en los hogares y que no tenga lugar en las zonas de paso de gases, dimensiones y tamaño de los equipos extractores de gases y, en todo caso, que estos equipos puedan tratar los diversos productos de la combustión sin corrosión, erosión y cumpliendo las normas ambientales, como las de SO_2, NO_x y descargas tóxicas.

CALDERAS DE CENTRALES TÉRMICAS

Las calderas de centrales de gran capacidad se clasifican según trabajen a presión subcrítica o supercrítica. Otra clasificación suele hacerse según se utilice circulación de agua natural o forzada.

Calderas supercríticas

Las calderas supercríticas (véase la Figura 3.8 de la página siguiente) son las que trabajan por encima de la presión crítica del diagrama agua-vapor, o sea, 225 bar, y a una temperatura de trabajo por encima de la temperatura crítica del agua de 374,2 °C. La presión crítica es la presión a la cual el agua y el vapor tienen la misma densidad, mientras la temperatura crítica es la temperatura por encima de la cual el agua no puede existir como líquido, no importa cuál sea su presión. Esto significa que el agua a la temperatura de 374,2 °C tendrá también la presión crítica de 225 bar absolutos. No hay calor latente de vaporización por encima de la presión crítica, ya

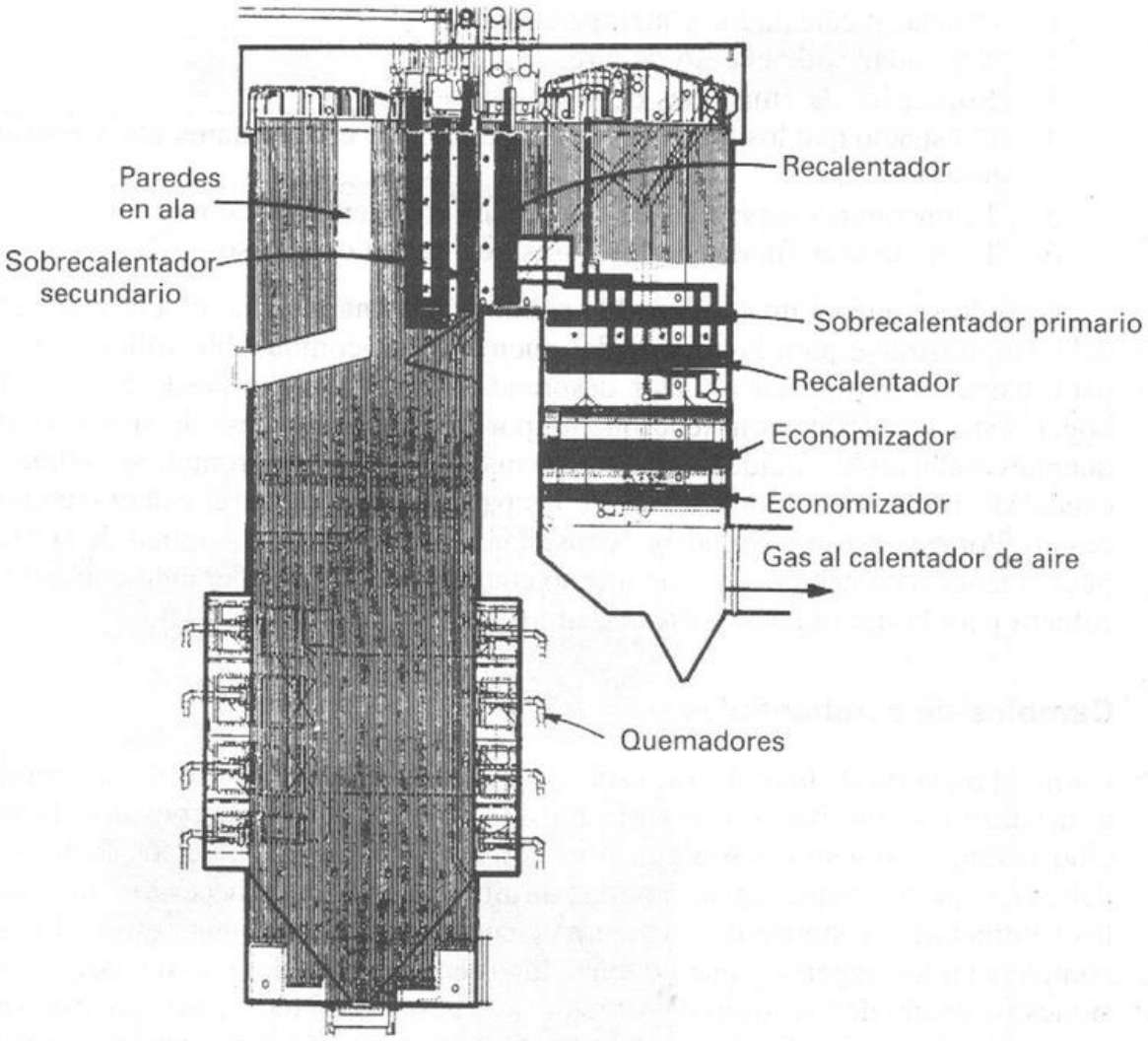


Figura 3.8. Un generador de vapor supercrítico tarado para 9.775.000 libras/hora a 4.200 psi de presión de salida, con salida del sobrecalentador de 1.010 °F y del recalentador de 1.000 °F, quemando carbón pulverizado y suministrando vapor a un turbogenerador de 1.300 MW. (*Cortesía de American Electric Power System.)*

que el agua y el vapor tienen la misma densidad. No hay calderín para separar el agua del vapor. Las calderas hipercríticas o supercríticas trabajan mediante y a través de los tubos de agua en contraste con las unidades convencionales donde el líquido puede circular a través de los tubos, más que en ellos, antes de convertirse en vapor. Esto se consigue mediante la circulación forzada y a través de la bomba de alimentación de caldera o bomba auxiliar, en contraste con las unidades de circulación natural en las calderas subcríticas.

La alimentación de agua en una caldera supercrítica se bombea a la entrada de la caldera y pasa en un camino o circulación continua a la salida de caldera. El agua de alimentación se introduce a una presión superior a la presión crítica, mientras que la temperatura del agua está por debajo de la temperatura crítica, pero aumenta a medida que pasa a través de la caldera. Hay una zona de transición donde el agua se convierte en vapor. Es necesario que la zona de transición esté en un lugar suficien-

temente caliente para llevar al agua por encima de la temperatura crítica, y suficientemente enfriada para evitar el calentamiento excesivo de los tubos. Además, las calderas supercríticas deben tener un control restrictivo de las condiciones químicas del agua de alimentación para evitar roturas de tubos a causa de impurezas y depósitos del agua. Es necesario purificar el agua de alimentación en un grado mucho mayor que para las calderas convencionales de calderín, de las que los depósitos pueden eliminarse mediante la purga periódica. La Figura 3.8 muestra una caldera supercrítica. La producción máxima continua es de 4.434 toneladas/hora a 269 bar y 543 °C a la salida del recalentador secundario. El recalentamiento es a 538 °C. Esta caldera suministra vapor a un turbogenerador de 1.300 MW.

El flujo del fluido a través de la unidad empieza en el economizador, a través de sus haces, y va hacia los dos cabezales de salida. Dos bajantes llevan el fluido al hogar y pasan por los circuitos de convección yendo hacia los sobrecalentadores primario y secundario. Cuatro líneas *crossover* (puente), o de unión entre los recalentadores primario y secundario, contienen los atemperadores del recalentador y las tuberías de conexiones del *bypass*. Hay dos salidas del sobrecalentador secundario y dos salidas del precalentador. La Figura 3.9 es una unidad supercrítica (245 bar

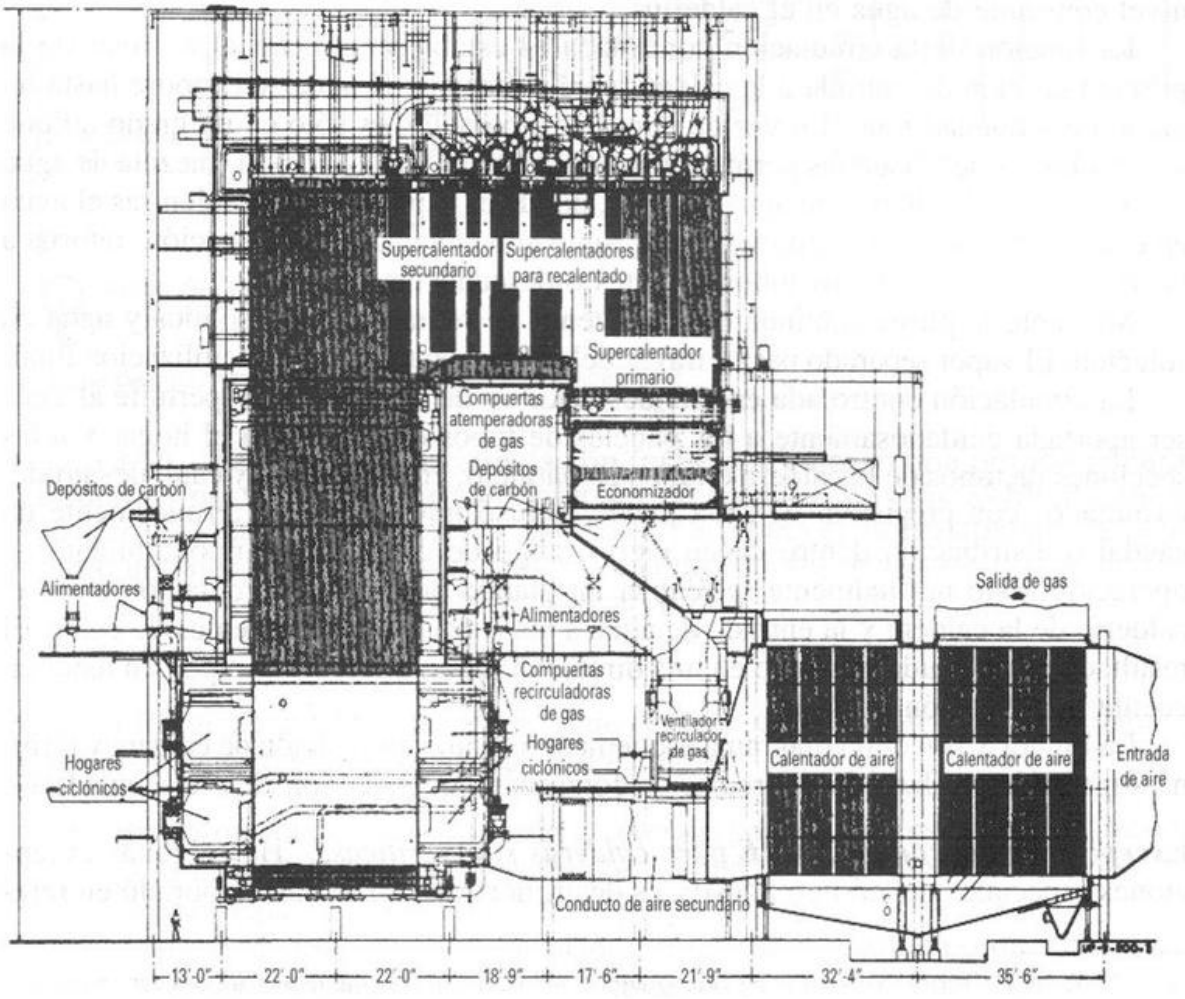


Figura 3.9. Caldera ciclónica de hogar a carbón, de 600 MW, 3.500 psi, 1.000 °F, con generador de vapor con dos recalentadores (*Cortesía de Indiana & Michigan Electric Co.)*

y 538 °C suministrando vapor a un turbogenerador de 600 MW) y utiliza válvulas de *bypass* para pasar vapor a un tanque *flash* (de vaporización instantánea) en el arranque. El depósito o tanque *flash* actúa como un calderín de caldera separando las partículas de humedad del fluido «flasheado»* de modo análogo al de un *scrubber***. El vapor despojado de la humedad se retorna al generador de vapor vía válvula de retorno de vapor y suministra por la bajante del sobrecalentador de vapor primario. Este método de operación del *bypass* de arranque reduce el arrastre de sílice a los sobrecalentadores. El vapor del *bypass* se dirige a través de los calentadores de agua de alimentación antes de ir al condensador, reduciendo así las pérdidas térmicas.

Calderas de circulación controlada. La caldera tipo «LaMont» mostrada en la Figura 3.10*a* se conoce como «caldera de circulación controlada***» porque la cantidad de agua que pasa por la caldera es de tres a veinte veces la cantidad de agua evaporada. Así se requieren dos bombas, una para la circulación del elevado caudal a través de los tubos (que no son de circulación natural) y la otra como bomba de alimentación convencional. La bomba de alimentación opera sobre el mismo principio, como la mayoría de las bombas de alimentación de calderas, de mantener un nivel constante de agua en el calderín.

La función de la circulación controlada es establecer un caudal a través de la primera sección de entrada a la caldera para evitar que el agua se evapore hasta un grado de sequedad total. En vez de ello, la evaporación es sólo en un grado tal que los sólidos y sales disueltas permanezcan en solución. Esta solución (mezcla de agua y vapor) pasa al calderín de agua y vapor, donde el vapor se separa mientras el agua en exceso se elimina. El agua separada, junto con el agua de alimentación, retorna a las bombas a través de los tubos bajantes o descendentes.

Mediante la purga continua o intermitente, se retiran algunos sólidos y agua en solución. El vapor separado pasa a través del sobrecalentador para su utilización final.

La circulación controlada en grandes calderas de tubos de agua permite al agua ser aportada cuidadosamente a los paneles de tubos que recubren el hogar y a las secciones de tubos de la caldera o tubos en paralelo, en cantidades y caudales predeterminados con precisión. El agua puede incluso intercambiarse térmicamente en caudal o distribución dentro de un cierto rango de cualquier tiempo siguiente de operación. Esto normalmente se realiza instalando bombas de circulación entre el calderín de la caldera y la entrada de agua a las superficies absorbentes de calor. El resultado es un caudal positivo en una dirección durante todo el tiempo, sin tener en cuenta la aplicación térmica.

La Figura 3.10*b* es un diagrama esquemático de una disposición de caldera y turbina supercrítica utilizando recirculación forzada y equipada con dos recalentadores.

Excepciones del código ASME para calderas supercríticas. Hay algunas excepciones especiales del código ASME, es decir, normas que se han elaborado en refe-

---

* *N. del T.:* Término utilizado en el lenguaje técnico coloquial de calderas para indicar «vaporizado instantáneo».

** *N. del T.:* Otro término técnico coloquial para designar el aparato lavador de gases a contracorriente.

*** *N. del T.:* Y forzada.

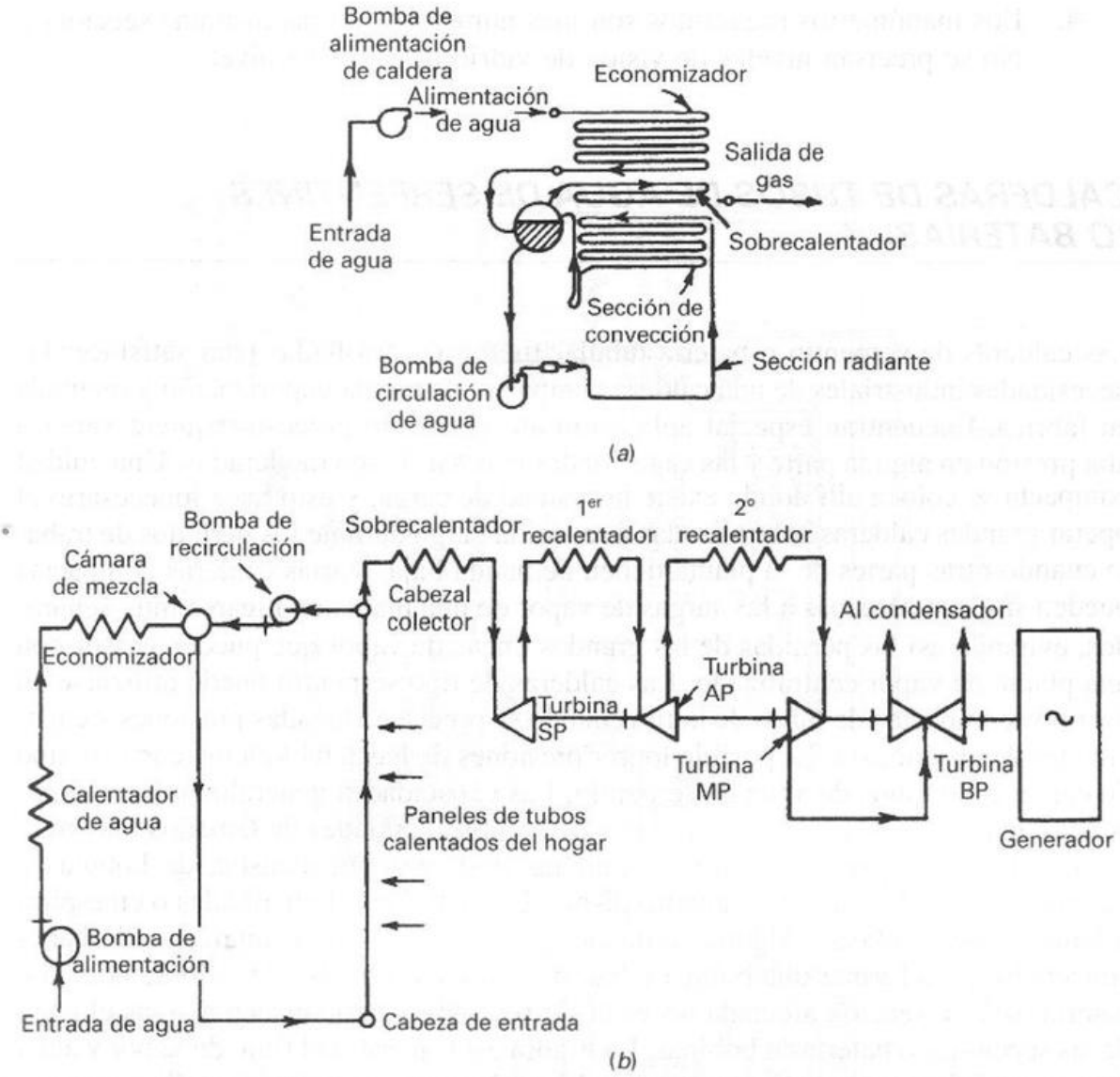


Figura 3.10. Las calderas de circulación forzada requieren una bomba separada además de la bomba de alimentación de caldera. (Diseño LaMont.) (*a*) El principio LaMont precisa bomba separada para vencer la resistencia de rozamiento al flujo. (*b*) Disposición caldera-turbina usando recirculación forzada en una caldera supercrítica.

rencia a los generadores de vapor de flujo forzado que no tienen líneas de agua y vapor pre fijadas o predeterminadas. Por ejemplo:

1. Es permisible diseñar las partes en presión para diferentes niveles de presión a lo largo del camino recorrido por el flujo de agua-vapor.
2. No se requiere tubería inferior de purga.
3. Si hay válvulas de corte instaladas en el camino del flujo de agua-vapor entre dos secciones cualquiera de línea, se precisan algunas válvulas de seguridad o válvulas de alivio de exceso de presión (incluso motorizadas), controles de enclavamiento por impulsos (esto es diferente a la típica caldera con válvulas de seguridad protegiendo toda la caldera).

4. Los manómetros requeridos son más numerosos en las distintas secciones. No se precisan niveles de visión de vidrio ni grifos de nivel.

CALDERAS DE TUBOS DE AGUA DE SERPENTINES (O BATERÍAS)

Las calderas de serpentín o batería tubular fueron desarrolladas para satisfacer las necesidades industriales de una caldera compacta, de rápida vaporización y montada en fábrica. Encuentran especial aplicación allí donde un proceso requiere vapor a alta presión en alguna parte y las capacidades necesarias son moderadas. Una unidad compacta se coloca allí donde existe necesidad de carga, y esto hace innecesario el operar grandes calderas centralizadas a reducida carga durante los períodos de trabajo cuando otras partes de la planta tienen demanda baja. Varias calderas compactas pueden situarse cercanas a las cargas de vapor de una planta en lugares muy separados, evitando así las pérdidas de las grandes líneas de vapor que pueden existir con una planta de vapor centralizado. Las calderas de tipo serpentín puede utilizarse en los tipos compactos de tubos de humo cuando se precisan elevadas presiones y capacidades de producción. Es posible lograr presiones de hasta 64 kg/cm^2 con este tipo de calderas de tubos de agua de serpentín. Las capacidades generalmente están por debajo de las 5 toneladas/hora, pero hay disponibles unidades de tamaños mayores.

Los tubos de generación de las calderas tipo serpentín constan de bobinas o baterías de tubo de pequeño diámetro dispuestas en bobinas helicoidales o en espiral o baterías horizontales. Algunas unidades grandes constan de una serie de haces conectados para formar una bobina o batería continua. En caso de fallo de bobina o batería, sólo la sección afectada necesita ser revisada y permanecen activas el resto de las secciones o baterías o bobinas. La Figura 3.11 muestra el flujo de vapor y agua de una unidad tipo serpentín (batería o bobina). Nótese que la caldera utiliza circulación y recirculación forzadas, lo que permite usar un tubo de pequeño diámetro con velocidades elevadas y altas tasas de transferencia térmica.

El flujo o caudal de agua y vapor en el sistema mostrado en la Figura 3.11 parte o arranca de la entrada de agua de la bomba de alimentación con el agua bombeada directamente al acumulador de vapor. La tasa de agua de alimentación está controlada por el nivel de agua que a su vez responde al control de nivel líquido del acumulador. El líquido circulante desde el acumulador se bombea a los paneles calentadores de la caldera. El caudal de líquido de los paneles o las baterías arrolladas en espiral (Fig. 3.11) se dirige hacia abajo en contra corriente con los gases calientes de combustión. Cuando abandona la sección espiral de generación, el fluido pasa a través del anillo termostático y la sección del arrollamiento helicoidal de tubo de agua y después a la boquilla separadora del acumulador. La acción centrífuga de la tobera o boquilla separa el vapor seco del líquido y permite al exceso de líquido retornar a la sección inferior. El vapor seco del acumulador se descarga sobre la parte superior a través de la válvula de descarga.

Una característica poco usual es el tubo del anillo termostático mostrado en la Figura 3.12 de la página 100. Este tubo es una parte integrante de la espiral o bobina

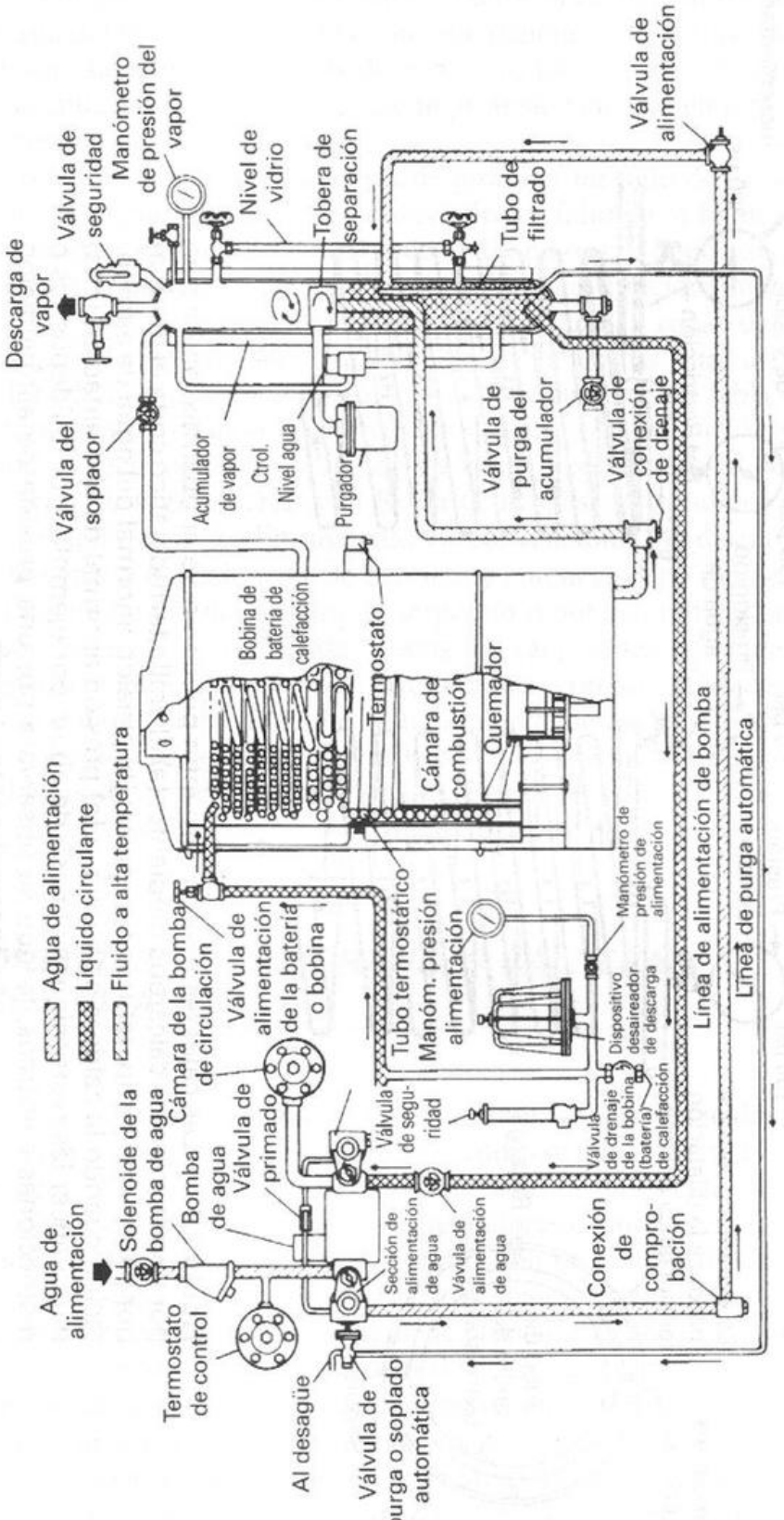


Figura 3.11. Caldera de serpentín de tubos de agua mostrando el flujo de agua y vapor. (*Cortesía de Clayton Mg. Co.*)

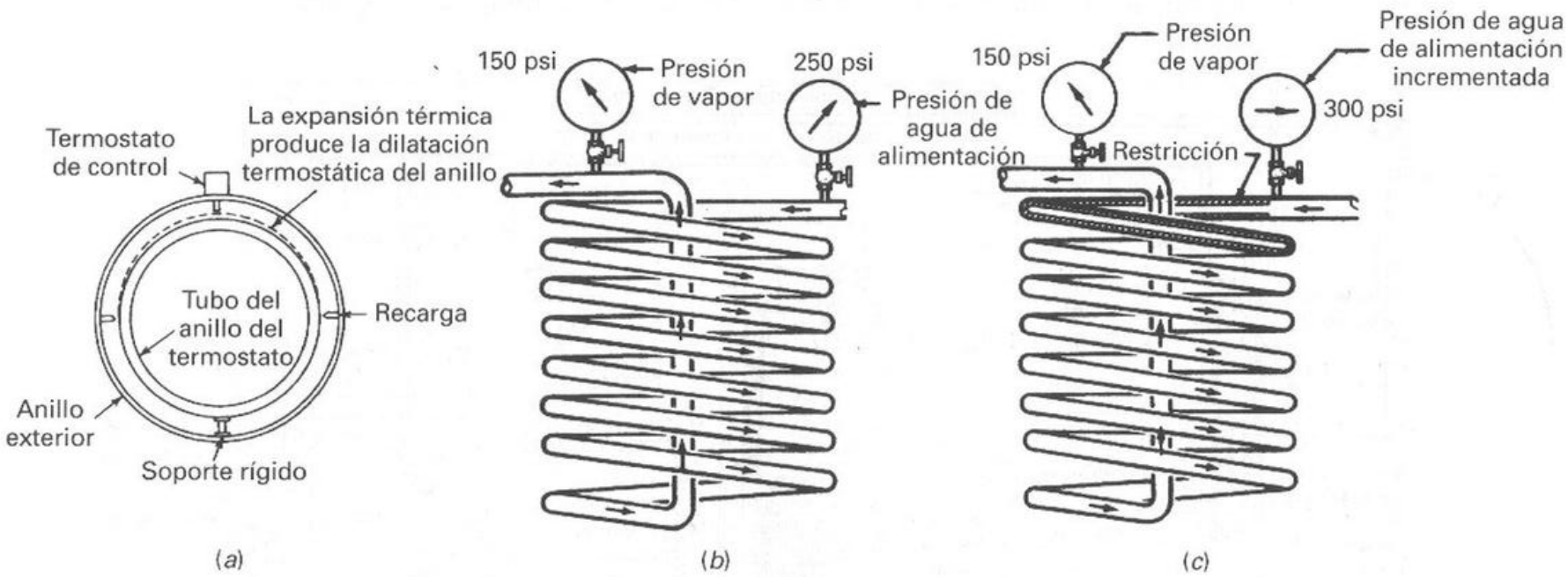


Figura 3.12. Las calderas de tipo serpentín pueden revelar obstrucción interna por revestimientos calcáreos mediante: (*a*) el anillo termostático corta el quemador para evitar temperaturas excesivas; (*b*) presión anormal del agua de alimentación cuando la caldera es nueva, o (*c*) presión anormal de alimentación (alta) para vencer las restricciones al paso de agua, por ejemplo, por los depósitos o restricciones calcáreos, lo que se observará por una presión de alimentación anormalmente elevada.

calentadora, actuada directamente por el calor de combustión. En caso de corte de agua o de condiciones excesivas de calor, el termostato de control se expansiona o dilata más allá del punto de consigna y de esa manera corta el flujo de combustible.

Otro diseño tiene tres conjuntos de bobina (o tubos arrollados en espiral) y los cabezales de entrada y salida. Se utiliza con profusión en pequeños tamaños de hasta 300 HP y presión de hasta 17,5 bar.

El mal funcionamiento del bucle puede producir un fallo de la bobina o batería por sobrecalentamiento. Éste puede sobrevenir por fallo de la bomba, bloqueo parcial de las líneas de entrada y salida, bloqueo del tubo (por depósitos), acumulación de hollín en las zonas de concentración de calor, mal funcionamiento de los controles, etc. Así pues, es esencial mantener limpias ambas zonas del lado del agua y del lado de gases de las baterías o bobinas de tubos. Es vital así mismo el tratamiento del agua de alimentación. A menudo se utiliza una tabla de presión diferencial para mostrar cuando la diferencia de presión de aspiración y de impulsión de la bomba de recirculación excede de un valor predeterminado de la presión diferencial. Véase la Figura 3.12*b* y *c*. Si así ocurre, es un signo de obstrucción del tubo o restricción del flujo. En una caldera convencional de diseño multitubo, un tubo con suciedad o depósitos puede cerrarse y entonces debe reemplazarse el tubo afectado. En cambio en una caldera de serpentín o bobina, toda la batería o bobina debe ser normalmente reemplazada. Todos los fabricantes de calderas compactas suministran excelentes manuales de instrucciones con sus unidades que incluyen las instrucciones de mantenimiento y tratamiento del agua de alimentación, así como la descripción de los controles utilizados. Los fabricantes principales de este tipo de calderas de serpentín son: Clayton, Besler, Francis, Mund-Parker, Vapor-Clarkson y Sid Parker

COMPONENTES DE LAS GRANDES CALDERAS DE TUBOS DE AGUA

El término *generador de vapor* se utiliza para indicar una gran caldera con muchos componentes de la superficie de calefacción, como se muestra en la Figura 3.13 de la página siguiente. Esto comprende paredes tapizadas de tubos de agua, economizadores, supercalentadores, recalentadores y calentadores de aire. Como se ve en la Figura 3.13, incluye también un equipo de combustión de combustibles (carbón, fuel o gas natural), sistemas de tiro, de descarga de gases o eliminación de cenizas, lo mismo que bucles de tratamiento de agua de alimentación en el circuito de suministro de agua. Las grandes calderas de tubos de agua tienen muchos más componentes absorbentes de calor que las calderas del tipo de tubos de humos (pirotubulares), y, lo mismo que otros detalles constructivos, necesita revisarse.

Las viejas calderas, especialmente las del tipo de tubos curvados, se usaban para colocarse por parejas con una pared de separación común entre ellas que cubría los dos colectores próximos a cada recubrimiento o pared. Éste podría ser un calderín de vapor o de lodos. Como las superficies exteriores de los colectores están recubiertas, se denomina a estos calderines-cabezales como *cabezales ciegos*.

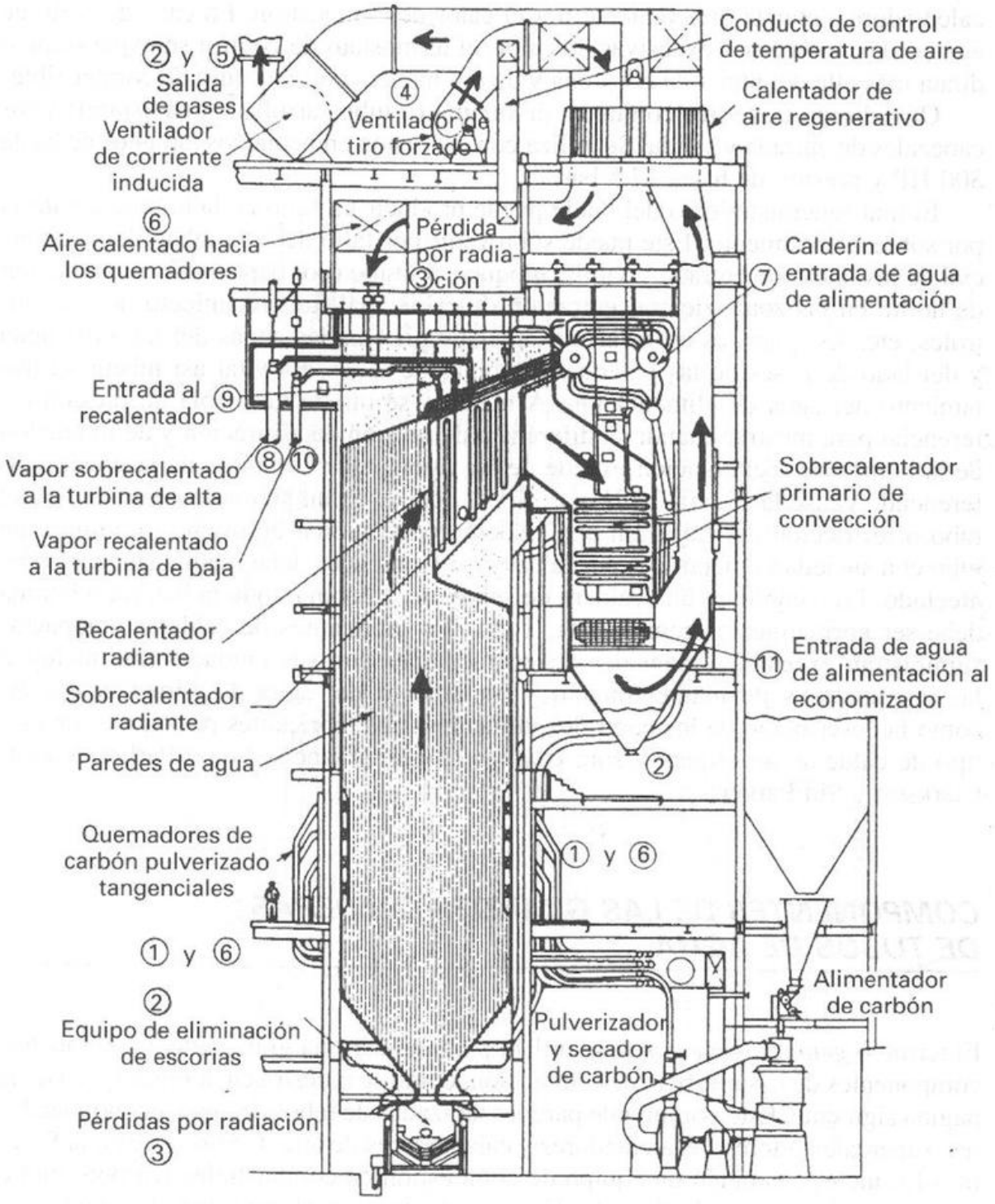


Figura 3.13. Componentes de un gran generador de vapor. (*Cortesía de Power magazine.*)

Hay una tendencia a depositarse el humo, cenizas y humedad en el espacio entre el refractario y las superficies exteriores de los calderines y cabezales. Y estas condiciones de depósitos no se observan directamente. En las antiguas inspecciones era normal para el inspector insistir en que se quitasen o picasen los refractarios de alrededor de los calderines ciegos. Así, la superficie externa era visible para la inspección y pruebas de espesor. Hoy en día, pueden usarse instrumentos ultrasónicos

para obtener un perfil del espesor del calderín. Estas comprobaciones sobre deterioro se hacen sin perturbar ni picar los refractarios, a no ser que las pruebas ultrasónicas de inspección indiquen que es necesario hacerlo.

Las puertas o portillos de fuego en las calderas de tubos de agua se precisa que sean de apertura exterior o de un tipo provisto de cerrojos autobloqueantes y de tipo sin resorte o fricción de contacto, de modo que la puerta no se abra por la presión del hogar en caso de rotura de tubos o explosión del hogar y así se evite la posibilidad de quemaduras o escaldamiento del operador que esté en la caldera*. Las puertas o trampillas de explosión sí se utilizan y se sitúan en paredes a una distancia de dos metros de las puertas de fuego o plataforma de caldera, y deben estar provistas de deflector, fundamentalmente para dirigir los gases o explosiones en la dirección conveniente (generalmente en la parte superior de la caldera y hacia arriba).

Los *bafles* dirigen los gases calientes convenientemente entre los pasos de tubos el número de veces (o cambios de dirección) necesarios para posibilitar una mayor absorción térmica por los tubos de la caldera. También permiten un diseño para mejorar las diferencias de temperatura entre tubos y gases a través de la caldera. Los *bafles* ayudan a mantener la velocidad de los gases, eliminan las bolsas y depósitos en zonas «muertas», depositan los cúmulos de cenizas volantes para su adecuada remoción y evitan las pérdidas elevadas de tiro. Cuando un bafle del hogar se rompe, los gases cortocircuitan uno o más pasos de gases, dando lugar a temperaturas excesivas de los mismos y a pérdidas de rendimiento y capacidad de la caldera. Puede así ocurrir sobrecalentamiento en aquellas partes de la caldera diseñadas para el paso de gases a temperaturas menores. Así, en una inspección en profundidad los *bafles* deberán siempre ser revisados para detectar erosiones, grietas, fugas (alrededor de los tubos) o dislocación de la que puede resultar una rotura de tubos.

Los *paneles de agua* constan de tubos verticales relativamente próximos y conformando los cuatro muros o paredes del hogar. Originalmente fueron desarrollados para enfriar y proteger el revestimiento refractario del hogar. Un diseño de calderas de una gran central de generación de energía (eléctrica) tiene tubos de 43 metros de altura, 8,6 milímetros de espesor de paredes de los tubos en la zona más caliente del hogar (por debajo de los 25 metros de altura), pero sólo 8,1 mm de espesor en los tubos superiores.

Dependiendo del tipo de calderas, la superficie calefactora de tubos de agua puede suponer sólo el 10 por 100 de la superficie total de calefacción de la caldera, incluso representa, como mucho, el 50 por 100 de la superficie total de absorción térmica. Las paredes de tubos de agua cumplen tres funciones básicas: (1) proteger el aislamiento de las paredes del hogar; (2) absorber calor del hogar para incrementar la capacidad de la unidad generadora; y (3) hacer estanco el hogar (en los hogares presurizados con tubos soldados tangentes).

El calor se transfiere a las paredes de humos como calor radiante desde la zona de mayor temperatura del hogar. A consecuencia de la gran cantidad de calor absorbido por esta parte de la caldera, el agua de alimentación debe ser de la mejor

---

* *N. del T.:* En la actualidad, los operadores de turno de calderas están en una sala separada y cerrada con aire acondicionado no sólo para ellos, sino para la instrumentación, control y regulación de gobierno de la caldera. Se manda a distancia y se aumenta la seguridad (telemando).

calidad. También la circulación del agua debe ser rápida y plena para asegurar un flujo positivo a través de cada tubo en todo momento.

Se necesitan válvulas de purga de cada cabezal o calderín en la parte superior de los colectores de los tubos de agua por las mismas razones que la caldera misma las necesita. La acumulación de sedimentos en un calderín que suministra a las paredes o paneles de tubos de agua puede causar la interrupción de la circulación, con el consiguiente recalentamiento y fallo de los tubos.

Cuidados y vigilancia. Bajo ninguna circunstancia los calderines de los paneles de tubos de agua deben purgarse mientras la caldera está trabajando. Si se purgan, la circulación normal de la caldera se verá afectada negativamente y los tubos sobrecalentados se hincharán o romperán. La Figura 3.14 muestra algunas disposiciones típicas. La pared o panel de tubos de agua de la Figura 3.14*a* está diseñada para una refrigeración moderada. Este diseño tiene los tubos espaciados entre ellos y la superficie de pared está formada de refractarios (ladrillos o piezas aislantes). El ladrillo refractario está protegido con varias capas aislantes y un fuerte *casing* o revestimiento metálico exterior. Los refuerzos metálicos se utilizan a menudo en la construcción de paredes o muros. La Figura 3.14*b* muestra cómo están colocados unos tubos tangentes en los hogares de muchas calderas pequeñas y grandes. La disposición de tubos tangentes ofrece una superficie altamente absorbente de calor que está respaldada por ladrillos sólidos o plásticos aislantes y un fuerte *casing* o estructura de chapa de cerramiento metálico exterior. La Figura 3.14*c* muestra unas tiras longitudinales o aletas soldadas a los paneles de tubos no tangentes. En algunos diseños las aletas salen del tubo hacia el hogar y están cubiertas con unos refractarios de base cerámica crónica o de escorias. Para asegurar el espesor del hogar, se sueldan aletas adyacentes a los tubos, constituyendo una pared o panel membrana tubular.

La Figura 3.14*d* muestra dos modernos *casings* o cerramientos de caldera estancos conocidos como pared o muro membrana. La estanqueidad se obtiene soldando una tira plana de metal entre los tubos. Esto elimina el *casing* o cerramiento exterior metálico y muchos de sus problemas. El aislamiento se aplica directamente al exterior de los tubos, mientras el revestimiento metálico se agrega para dar a la superficie exterior durabilidad y buena apariencia. La Figura 3.14*e* muestra cómo se construye el *casing* exterior, el aislamiento y el *casing* pelicular de acero.

Tensiones de las paredes de tubos de agua. La combustión del combustible en suspensión en hogares grandes puede crear una explosión por ignición retrasada en la zona de flujo. En algunos hogares, la presión resultante puede ascender a valores elevados; sin embargo, la mayoría de los diseñadores de generadores de vapor usan refuerzos de las paredes de agua para proteger las paredes contra las explosiones, escapes o explosiones menores que parecen alcanzar cerca de 0,35 bar de presión. Es algo a revisar con el fabricante de la caldera, ya que algunas explosiones de hogar han alcanzado valores mucho más altos de esta presión. Esto produce la expansión de los tubos (doblado) hacia el exterior y, en algunos casos, desprendimiento de los tubos de su conexión a los calderines o cabezales.

Para reforzar las paredes del hogar, los diseñadores de calderas utilizan barras y perfiles en U soldados a los tubos para formar una banda alrededor de las paredes o

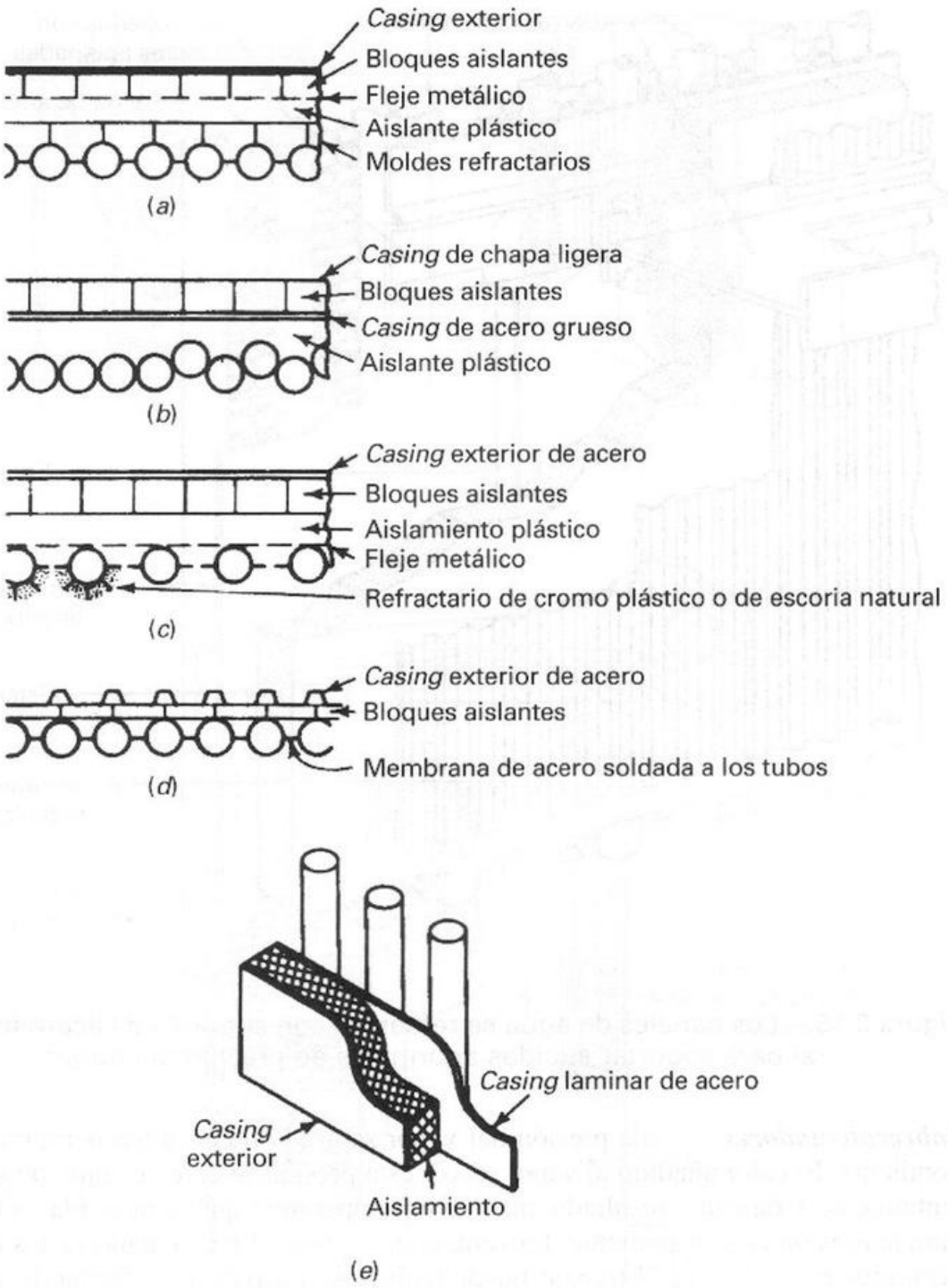


Figura 3.14. Disposiciones posibles de paredes de tubos de agua en un generador de vapor.

paneles de agua a diferentes niveles, basándose en las fuerzas que deben resistirse a partir de una expansión del hogar. Véase la Figura 3.15 de la página siguiente. *Barras conectoras* se utilizan para transmitir las fuerzas desde las bandas de refuerzo que rodean los muros de agua hasta las vigas soporte del generador de vapor que, a su vez, están conectadas a los pilares o columnas de acero.

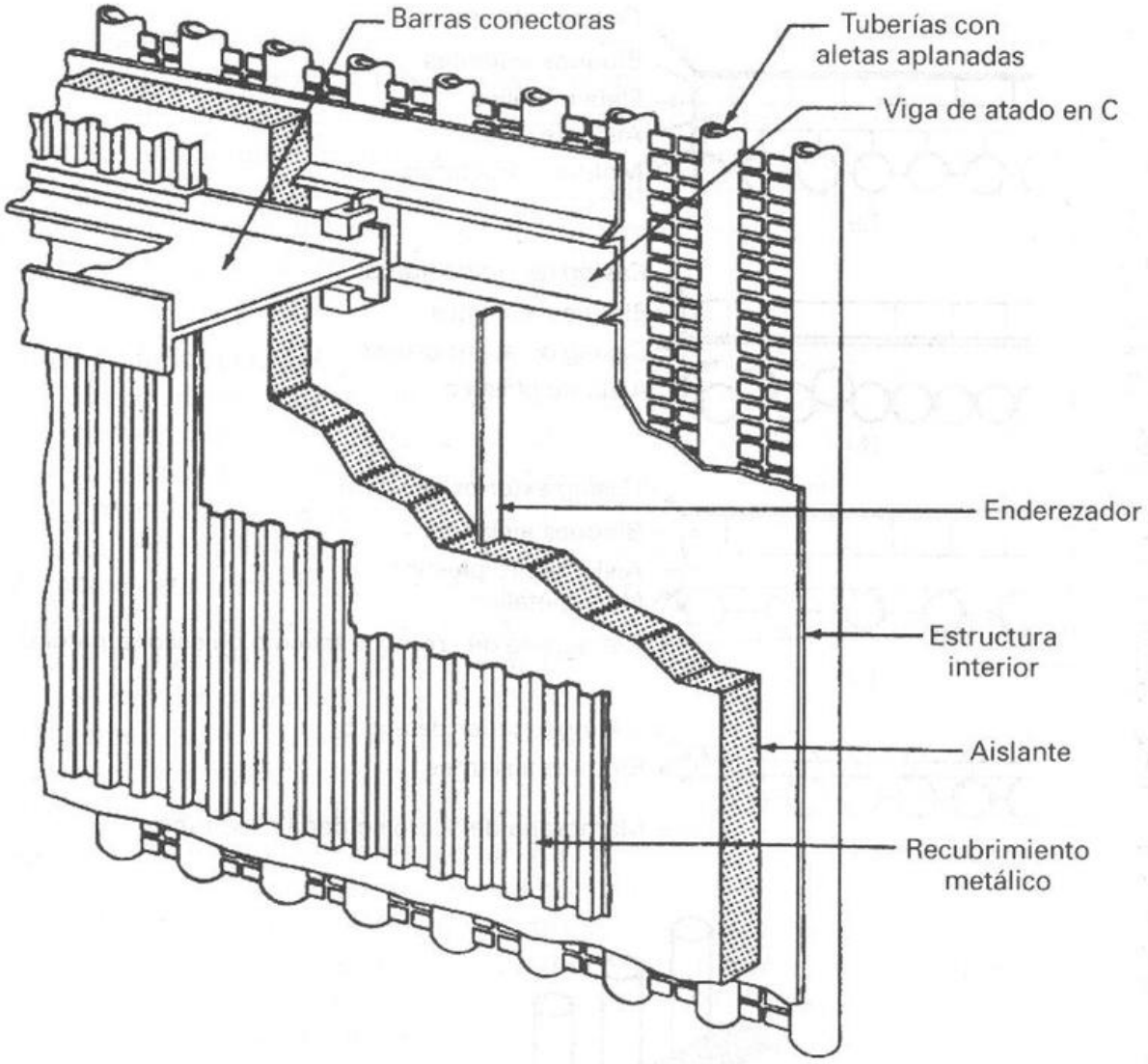
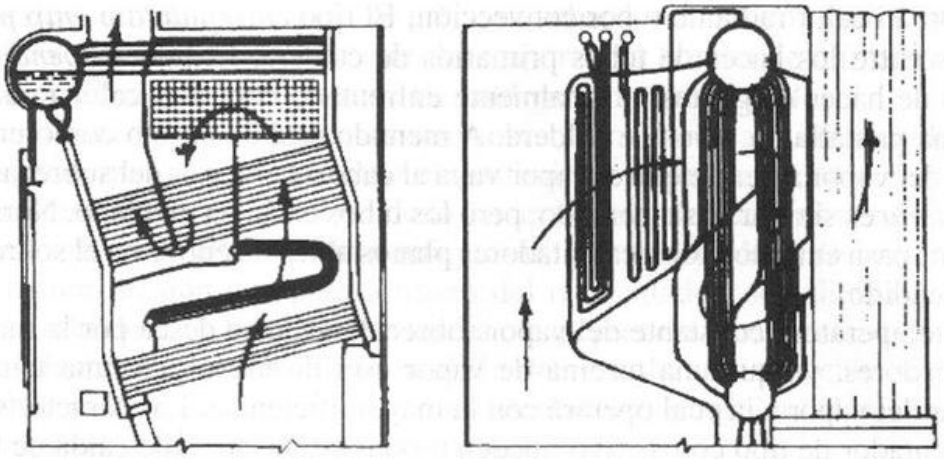


Figura 3.15. Los paneles de agua se refuerzan con soportes de acero estructural para soportar subidas anormales de presión del hogar.

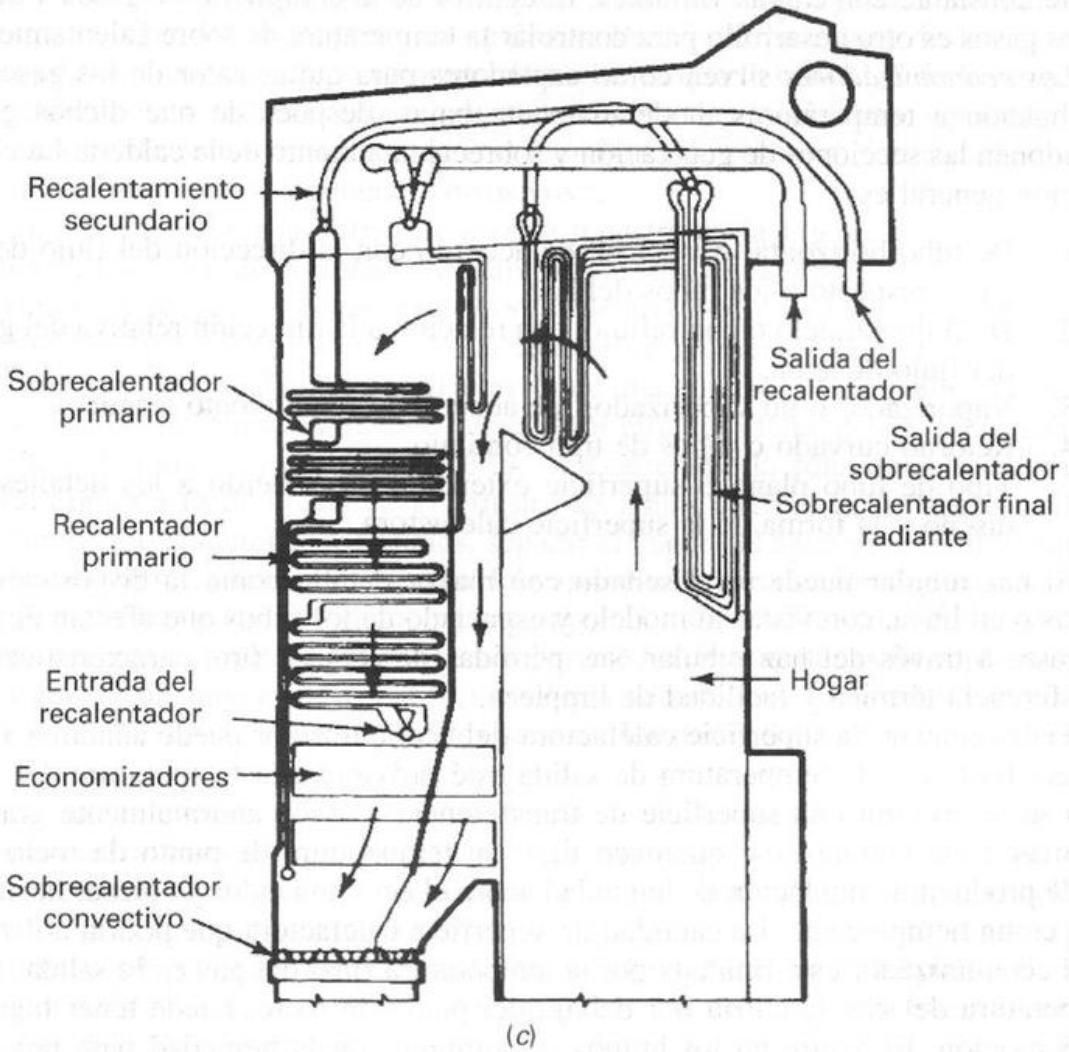
Sobrecalentadores. Cada presión del vapor saturado tiene su temperatura correspondiente. El calor añadido al vapor seco a esta presión se conoce como de sobrecalentamiento y da como resultado una mayor temperatura que la indicada en la curva para la presión correspondiente. La ventaja del vapor sobrecalentado en los motores primarios es doble: (1) El trabajo puede realizarse a través de la forma de sobrecalentamiento antes de que tenga lugar la condensación. Esto representa un incremento en el rendimiento del uso del vapor. (2) Este período de trabajo realizado con vapor seco elimina los efectos corrosivos y agresivos del condensado. El deterioro de los álabes de alta velocidad de la turbina causado por el choque de las gotitas de condensado puede ser considerable y comparable a la erosión producida por un tiro de perdigones.

El sobrecalentamiento se produce al pasar el caudal de vapor saturado proviniente de una caldera por un sobrecalentador de uno u otro tipo, radiante o convectivo.

La Figura 3.16 muestra algunos sobrecalentadores y sus situaciones en la caldera. La clasificación general incluye los tipos radiante y convectivo, dependiendo de



(*a*) (*b*)



(*c*)

Figura 3.16. Las designaciones del sobrecalentador incluyen: convectivo, radiante, primario, secundario y de acabado (final), dependiendo de la disposición del generador de vapor.

que absorban calor radiante o por convección. El tipo *entreplanta o entrepiso* tiene los tubos entre los haces de tubos primarios de caldera. El tipo *suspendido* es un conjunto de haces colgantes, normalmente enfrentado contra el calor radiante mediante una pantalla de tubos de caldera. A menudo está dispuesto como primer calentador del vapor antes de que el vapor vaya al cabezal exterior del sobrecalentador. El tipo *plano* es similar al suspendido, pero los tubos están en un plano. Normalmente el vapor pasa entre los sobrecalentadores planos antes de entrar en el sobrecalentador suspendido.

Una temperatura constante del vapor sobrecalentado se desea por la mayoría de los diseñadores, ya que una turbina de vapor está diseñada para una temperatura particular del vapor a la cual operará con la mayor eficiencia. Las características del sobrecalentador de tipo convectivo pueden producir una curva de caída de temperatura con tasas de combustión crecientes, mientras la inversa puede ser real con los tipos radiantes. Así pues, se emplea una combinación de los dos tipos, en ciertas instalaciones, para conseguir una temperatura del vapor sobrecalentado prácticamente constante con cargas variables. El control de la compuerta de gases a través de los pasos es otro desarrollo para controlar la temperatura de sobre calentamiento.

Los economizadores sirven como captadores para quitar calor de los gases de combustión a temperaturas moderadamente bajas, después de que dichos gases abandonen las secciones de generación y sobrecalentamiento de la caldera. La clasificación general es:

1. De tubo horizontal o vertical, de acuerdo con la dirección del flujo de los gases respecto a los tubos del haz.
2. De flujo paralelo o contraflujo, con relación a la dirección relativa del gas y del flujo de agua.
3. Vaporizador o no vaporizador, de acuerdo al rendimiento térmico.
4. Retorno curvado o tubos de tipo continuo.
5. Tipo de tubo plano o superficie extendida, de acuerdo a los detalles del diseño y la forma de la superficie calefactora.

El haz tubular puede ser diseñado con mayor detalle como la disposición en etapas o en línea, con vistas al modelo y espaciado de los tubos que afectan el paso de gases a través del haz tubular, sus pérdidas de carga o tiro, características de transferencia térmica y facilidad de limpieza.

Teóricamente, la superficie calefactora del economizador puede añadirse a una caldera hasta que la temperatura de salida esté próxima a la temperatura del aire. Pero se necesitaría una superficie de transferencia térmica anormalmente grande. Además, cada combustible quemado tiene su temperatura de punto de rocío que puede producir acumulación de humedad sobre el economizador y corroer la superficie en un tiempo corto. La cantidad de superficie calefactora que podría utilizarse en el economizador está limitada por la temperatura final del gas en la salida. Si la temperatura del gas se enfría por debajo del punto de rocío, puede tener lugar la condensación. El azufre en los humos se combina con la humedad para producir ácido sulfuroso, que es extremadamente corrosivo para todos los aceros de construcción en contacto con los gases entre el economizador y la chimenea.

El agua de alimentación de bajo contenido en oxígeno es muy recomendable para ser usada con los economizadores de tubo de acero. Las válvulas de seguridad

(válvulas de seguridad de vapor) se precisan sobre los economizadores para protegerlo contra la presión excesiva que debe aportar la bomba de alimentación si el regulador o válvula de alimentación de caldera estuviera cerrado.

Un *recalentador* es básicamente otro sobrecalentador usado en la caldera de las centrales modernas para incrementar el rendimiento de la planta. Mientras el sobrecalentador toma vapor del calderín de la caldera, el recalentador obtiene vapor utilizado de la turbina de alta presión a una presión por debajo de la de la caldera. Este vapor a menor presión que pasa a través del recalentador, se calienta a 537 °C y después se introduce en la turbina de media o baja presión. Los recalentadores, como los sobrecalentadores, se clasifican también de acuerdo a su situación en la caldera como convectivos o radiantes. Los sobrecalentadores y recalentadores de convección pueden ser de tipo horizontal o suspendido.

Los *calentadores de aire* hacen la recuperación térmica final de los gases o humos de caldera con los que se precalienta el aire de entrada al hogar para su combustión con el fuel o gas natural o combustible correspondiente. Así algo de combustible se ahorra, ya que de otro modo se utilizaría para precalentar la mezcla aire-combustible hasta su punto de ignición. Pero la temperatura de los gases no debe reducirse por debajo de su punto de rocío, ya que la humedad de los gases los condensaría. Esto podría producir agua que combinada con el azufre y posiblemente con dióxido de carbono, y también con monóxido de carbono, formaría los ácidos sulfuroso y carbónico, altamente corrosivos*.

Un *calentador regenerativo de aire* se muestra en la Figura 3.17 de la página siguiente. Este tipo de calentador de aire ofrece una gran superficie de contacto de transferencia de calor. Normalmente consta de un rotor que gira cerca de dos o tres revoluciones por minuto (rpm) y está relleno de elementos corrugados de chapa metálica. Los gases calientes pasan a través de una mitad del calentador, el aire pasa a través de la otra mitad. A medida que el rotor gira, los elementos de almacenaje de calor transfieren el calor obtenido de la zona caliente a la zona de entrada de aire.

La Figura 3.18 de la página 111 ilustra las zonas internas de un típico calderín, que cumple dos funciones esenciales: separar el vapor del agua para suministrarla al sistema de bajantes limpia y separada del vapor para la circulación segura y correcta, y separar la humedad del vapor para entregar vapor de alta calidad. La partes o piezas internas cumplen estas funciones por medio de dos etapas de separación. El nivel normal de agua es de 1,5″ (38,1 mm) por debajo de la línea central horizontal del calderín. Los eliminadores Vortex separan los pasos del vapor y del agua en el calderín.

La mezcla total de agua-vapor del generador de vapor se dirige a los tubos separadores horizontales (Fig. 3.18). Esta mezcla agua-vapor entra a los separadores y es centrifugada al seguir el contorno curvado del domo separador. La mayoría del agua separada se descarga horizontalmente al nivel de agua del calderín. El vapor separado fluye desde el «chevron» a través de la caja separadora y después a la parte superior del calderín, vía los tubos de vapor a través de la cubierta hacia la pared o tabiques del sobrecalentador.

---

* *N. del T.:* Y no digamos si se produjese ácido nítrico como consecuencia de los óxidos de nitrógeno de la combustión.

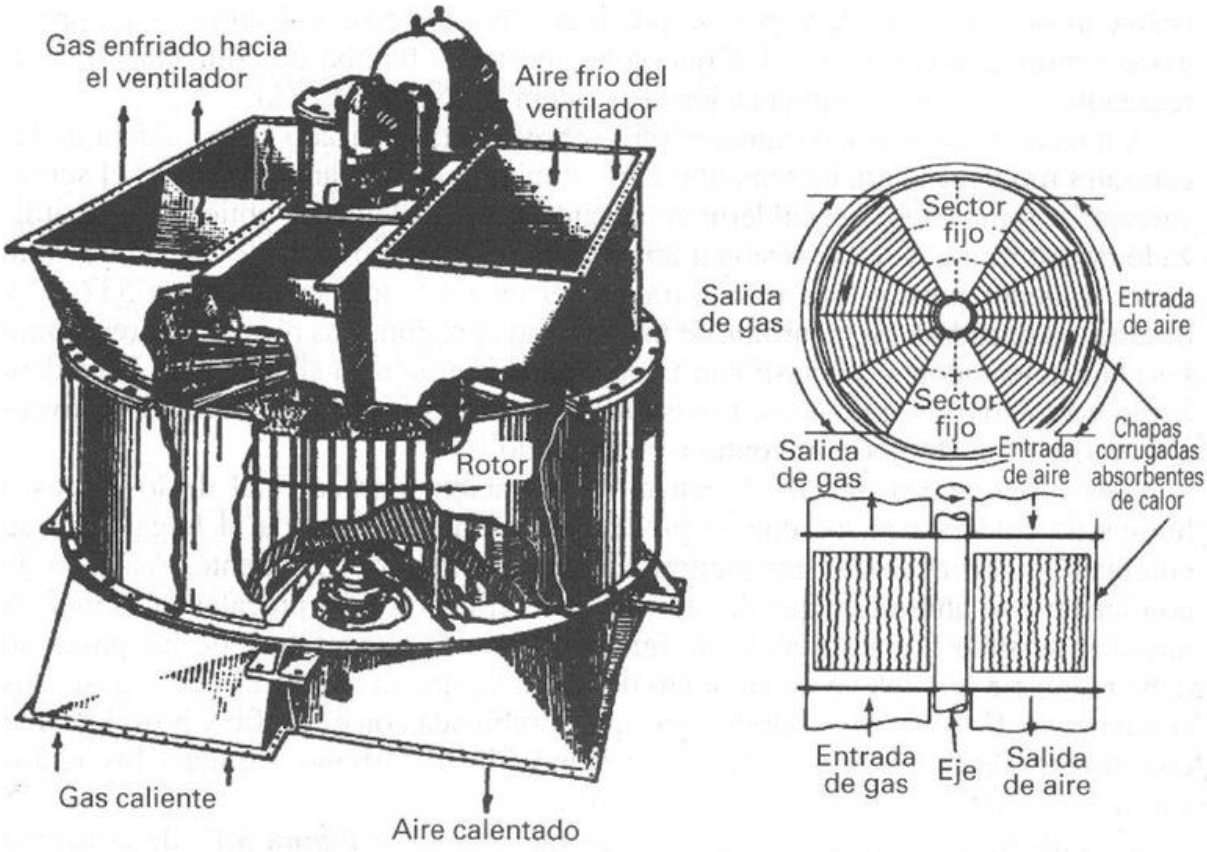


Figura 3.17. El precalentador de aire rotativo regenerativo precalienta el aire de combustión. (*Cortesía de Air Preheater Corp.*)

La salida de la línea principal de vapor será adecuada normalmente para tratar la capacidad nominal de caudal. El código ASME de calderas ha definido normas sobre la salida a la válvula de seguridad. Por ejemplo, el sistema interno de tubos colectores de vapor, chapas o paneles está permitido utilizarlo cerca de las aberturas de las válvulas de seguridad siempre que se cumpla que «el área total para entrada de vapor no sea menor que el doble de las áreas sumadas de las conexiones de entrada de las válvulas de seguridad. Los orificios de tales tubos colectores de vapor deberán ser al menos de 1/4″ (6,4 mm) de diámetro».

En el caso de separadores de vapor o secadores, la abertura de 1/4″ de diámetro no se aplica, supuesto que «el área neta libre de entrada de vapor del separador o secador es al menos diez veces el área total de las salidas de vapor de la caldera para las válvulas de seguridad». Por otra parte, cuando se inspeccionan las partes internas de los calderines, se deben comprobar las condiciones de los orificios de 1/4″ en los tubos colectores. Deben estar libres y limpios. Lo mismo se aplica a las aberturas de los secadores, ya que los secadores cerrados sobre los tubos colectores pueden producir restricciones en las aperturas de la válvula de seguridad. Esto reduciría la capacidad de alivio de caudal, lo que podría ser peligroso.

Soportes del calderín generador de vapor Los calderines de las calderas de tubos de agua más pequeñas están generalmente soportados en la parte superior como se ve en la Figura 3.19*b* de la página 112. Los calderines de calderas mayores o generadores

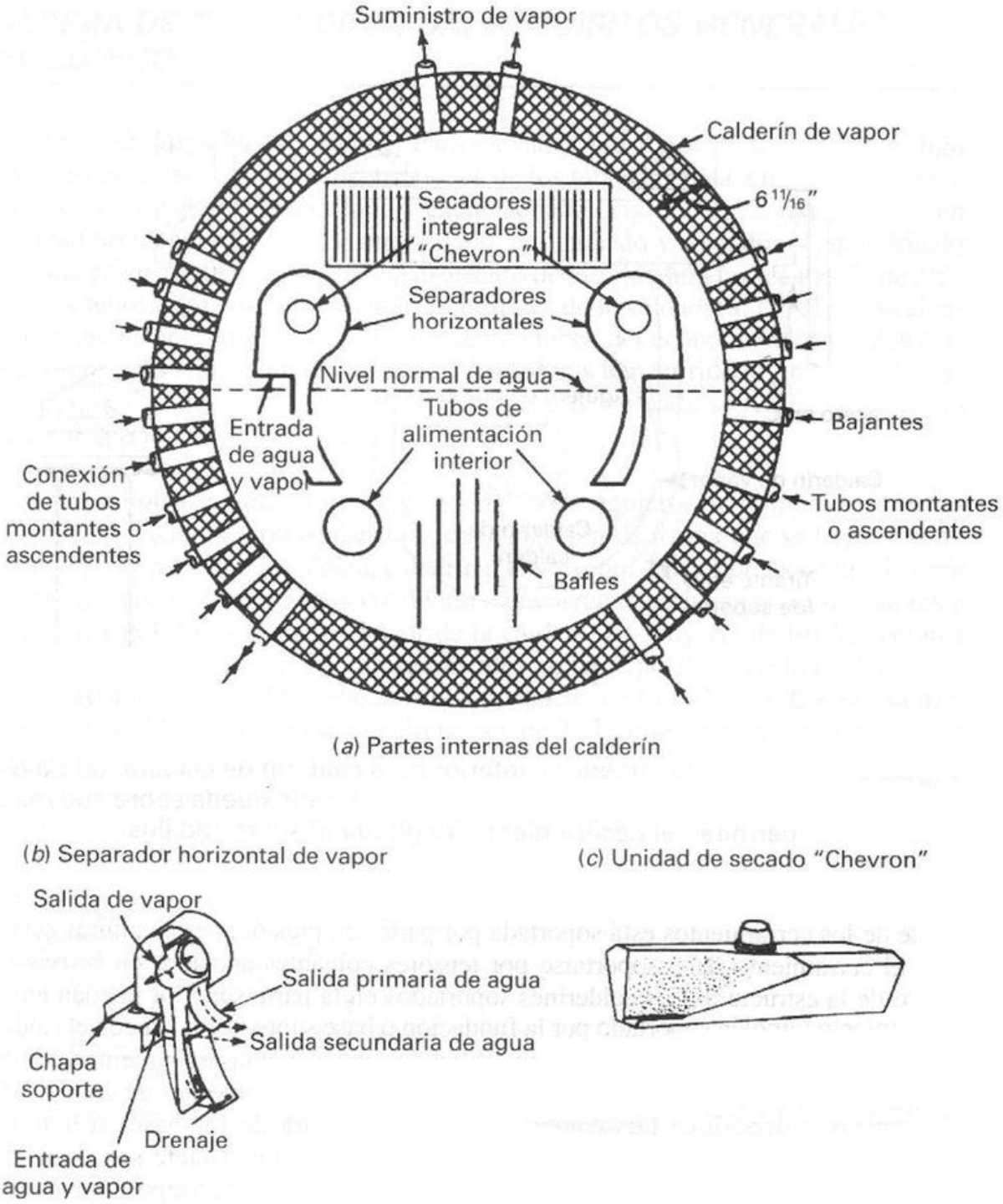


Figura 3.18. Partes internas de un calderín de vapor de alta presión mostrando el separador de vapor y secador «Chevron».

de vapor grandes están soportados en su parte superior, como se ve en la Figura 3.19*a*. Los calderines deben ser capaces de moverse y poder dilatar en su dirección longitudinal con los cambios de temperatura de la unidad. Las unidades soportadas en su parte superior tendrán rodillos en un extremo del calderín de forma que puedan dilatar o contraer con los cambios de temperatura. Los cierres o cerramientos normalmente constan de paneles de agua y calderines soportados en la parte superior,

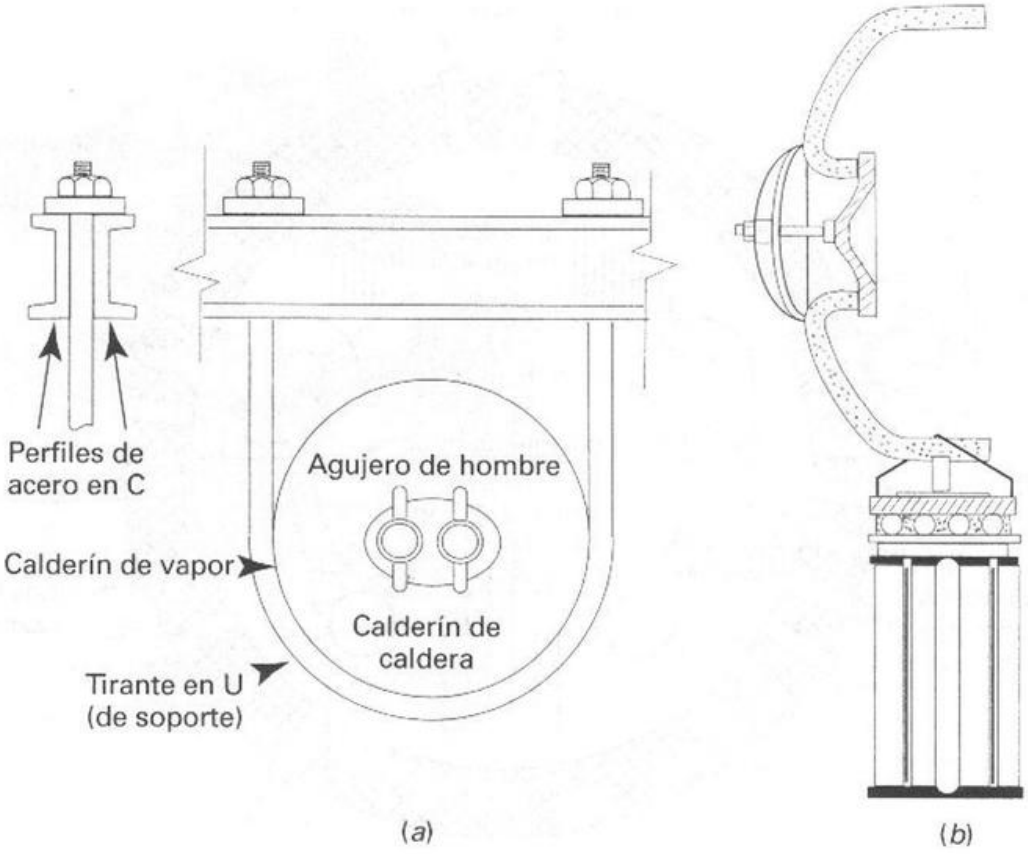


Figura 3.19. Soportes superior e inferior para calderín de caldera. (*a*) Calderín soportado con tirantes en U*. (*b*) El calderín soportado queda sobre apoyos que permiten el deslizamiento longitudinal sobre rodillos.

parte de los cerramientos está soportada por partes en presión, pero a alturas superiores, el cerramiento debe soportarse por tensores colgantes anclados en las vigas de acero de la estructura. Los calderines soportados en la parte superior pueden tener el cerramiento también soportado por la fundación o base sobre la cual queda el calderín.

Los *sopladores de ceniza* son muy utilizados en las plantas que queman combustible pulverizado para mantener limpias las superficies absorbentes de calor y libres de cenizas y depósitos. Los cambios en la temperatura de los gases o humos de combustión a carga y tiro constantes o pérdida de carga constante son indicativos necesarios para el soplado de los tubos en los pasos de gases. Es importante comprobar la alineación del soplado de cenizas y la fuga de condensado de los sopladores que pueda afectar a los tubos por erosión o corrosión. La frecuencia del soplado o limpieza de cenizas dependerá del combustible quemado y de las condiciones encontradas durante las inspecciones. Normalmente, el fabricante de la caldera suministrará un modelo de condiciones y mantenimiento, que puede ajustarse y afinarse si es preciso y lo demandan las condiciones encontradas en las inspecciones o una operación normal del trabajo.

---

* *N. del T.:* En castellano o español técnico coloquial se denomina «Ues» o «Ces» a estos perfiles estructurales de acero laminado, al igual que a las I se les llama «dobles te» y a los Z buenos «zeta».

CALDERA DE TUBOS DE AGUA. REQUISITOS GENERALES DEL CÓDIGO

Accesorios de los tubos de agua. Para elevadas presiones de trabajo, el código ASME estipula las siguientes disposiciones de los tubos de agua a tubos membrana, cabezales y drenaje: (1) mandrilado y expansionado (Fig. 3.20); (2) mandrilado con conicidad no menor de 1/8″; (3) mandrilado, ensanchado y soldado; (4) mandrilado y soldado en su asiento, supuesto que el asiento de la soldadura no sea mayor de 3/8″ y que los tubos están vueltos a mandrilar después de la soldadura; (5) el sobrecalentador, recalentador, paneles de tubos de agua o tubos del economizador pueden soldarse sin mandrilado, suponiendo que las soldaduras han sufrido un tratamiento térmico después de ser efectuadas y que el proceso de soldado se realiza de acuerdo con los requerimientos del Código.

Aberturas de inspección. El código ASME exige agujeros de hombre y agujeros de inspección manual u otras aberturas de inspección de forma que se haga posible el examen y limpieza de la caldera, calderín o envolvente. Las calderas de tipo batería o bobina de tubo no tienen el típico calderín o envolvente, pero tienen acumuladores y separadores exteriores fuera del hogar de la caldera. La mayoría de los inspectores desean comprobar si algún tipo de sedimentos se ha depositado en la caldera.

Las aberturas de hombre deben ser de un mínimo de 11 × 15″ (280 × 380 mm) o de 10 × 16″ (250 × 400 mm) si son elípticas y de 380 milímetros de diámetro si son circulares.

Las aberturas de operación manual no pueden ser menores de 70 x 89 mm de tamaño.

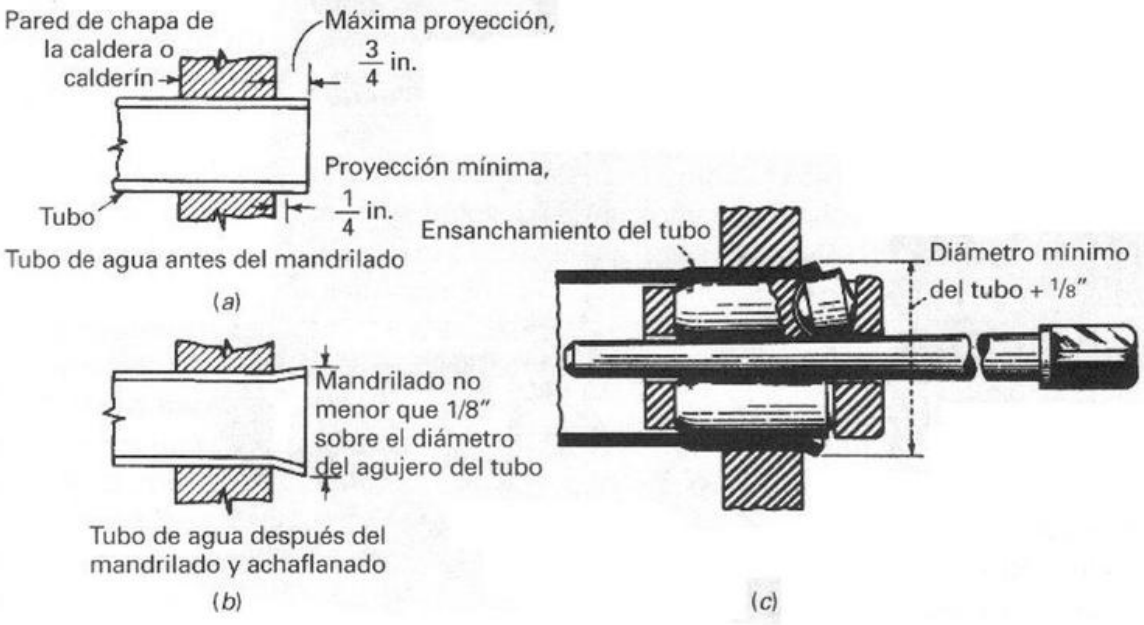


Figura 3.20. Los tubos de las calderas de tubo de agua están mandrilados. (*a*) y (*b*) Detalles del ensanchamiento y mandrilado según el Código. (*c*) Rodillos expansores del tubo y acampanado o ensanchado al mismo tiempo.

Los orificios taladrados utilizados para inspección o lavado no deben ser menores de 1″ (25,4 mm) de diámetro en tubería. Sobre las calderas de pared-membrana y calderín es normal encontrar un agujero de hombre estándar al menos en cada extremo del calderín. Las aberturas de mano están previstas en la parte exterior de los calderines de lodos para permitir la limpieza e inspección.

Conexiones de nivel (columnas de nivel de agua). La columna de agua está conectada a la parte superior e inferior de cabezal delantero del calderín principal de vapor (véase la Figura 3.21). Si hay varios calderines instalados al mismo nivel, no es necesario normalmente instalar una columna de agua separada para cada calderín, ya que el nivel de agua se iguala en todos los calderines.

Las columnas de agua (niveles) deben montarse y ser visibles al operador, de modo que muestren en todo momento si la línea normal de agua de la caldera se mantiene. Las tuberías que conectan la columna (de nivel) a la caldera deben ser de un diámetro mínimo de 1″. Para las calderas que trabajan por encima de 28 kg/cm^2, se precisan empaquetaduras o juntas en la tubería de conexión inferior para reducir el diferencial de temperatura entre los niveles (columnas) y la caldera de forma que exista precisión en el nivel de agua de las columnas.

Las aberturas de inspección y limpieza son necesarias sobre los tubos que conectan los niveles a la caldera. No se permiten válvulas de corte entre el nivel y la

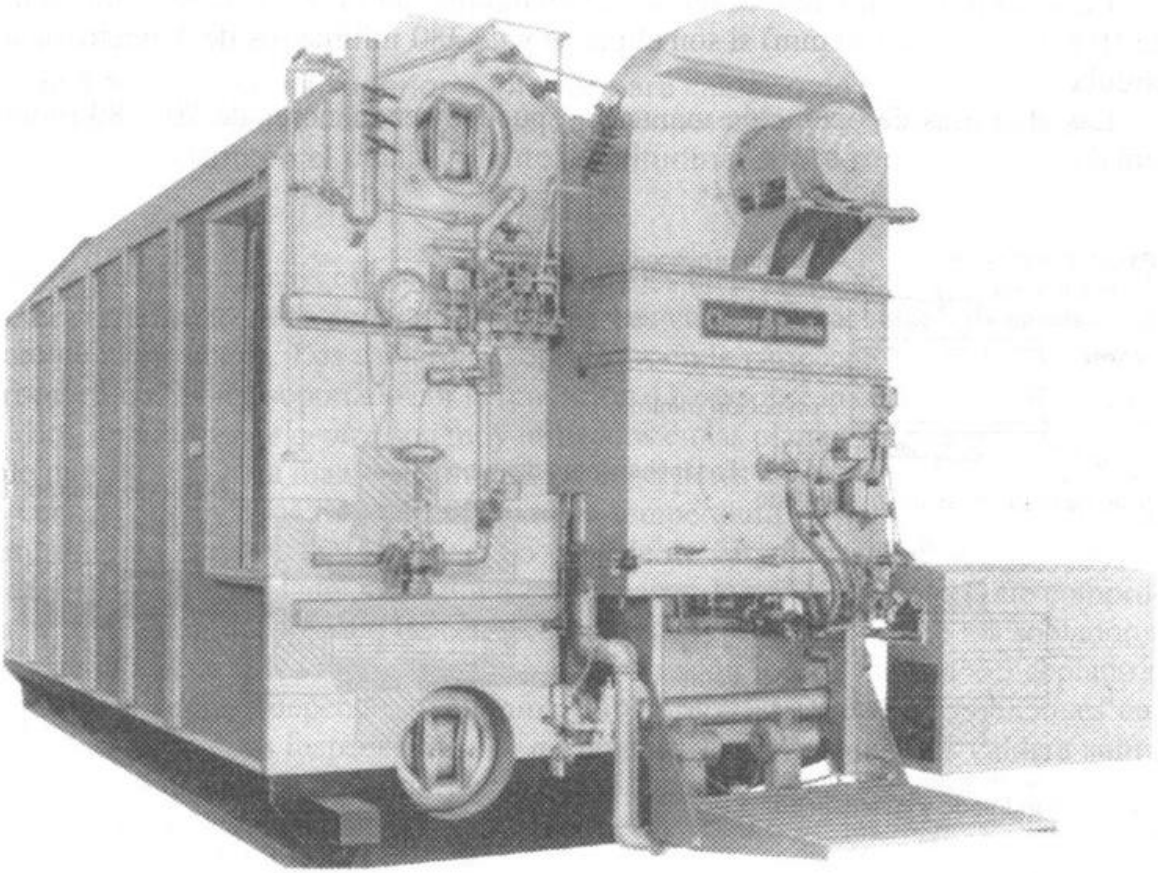


Figura 3.21. El agujero de hombre, la columna de agua y el nivel de vidrio están situados en la parte superior de esta caldera compacta tipo D. (*Cortesía de Cleaver Brooks Co.*)

caldera a no ser que los grifos o conexiones sean de una disposición o construcción tal que evite que se acumulen los sedimentos en las citadas conexiones. Las válvulas o grifos deben tener indicadores para mostrar si están abiertas o cerradas, y deben estar bloqueadas o fijadas en posición abierta durante la operación.

Los *cristales o vidrios de nivel* que muestran el nivel de agua deben ser visibles al operador ubicado en la zona de trabajo de la caldera. Como las calderas grandes de tubos de agua pueden ser muy altas, puede llegar a ser complicado poder ver el cristal o vidrio del nivel desde la zona de trabajo. En estas condiciones, la imagen del (vidrio) nivel de agua se transmite normalmente al área de trabajo mediante una indicación remota de nivel, como espejos, TV en circuito cerrado y disposiciones similares. Sin embargo, el Código requiere que si el vidrio de nivel no puede verse desde el área de trabajo, deben instalarse dos indicadores independientes de nivel de control remoto.

Una regla similar existe para los manómetros de caldera o controles de vapor utilizados por los operadores de caldera. Los manómetros deben instalarse o conectarse con cabinas de control remoto de la zona de operación; sin embargo unos indicadores de presión remotos del sistema neumático, eléctrico o de otro tipo, deben también ser dos de tipo independiente. El Código también requiere que bajo cualquier condición de lectura de presión remota, haya al menos un manómetro de caldera de lectura directa en situación visible dentro del área de zona de trabajo de la caldera.

Muchos organismos requieren plataformas y escaleras permanentes de caldera con pasos de entrada de hombre a cierta altura. Las calderas deberían también equiparse con pasarelas y barandillas de seguridad de modo que permitan y propicien una inspección adecuada y segura y permitir así que se lleve a cabo un adecuado mantenimiento de caldera.

PRODUCCIÓN, TARADO Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS CALDERAS

Las grandes calderas de tubos de agua tienen complejos circuitos de circulación que constan de muros pantalla, paneles de agua, sobrecalentadores de paneles radiantes que están diseñados para que el caudal másico pase a través de los tubos a diferentes cargas con la idea de mantener los tubos metálicos dentro de un límite seguro de temperatura. El caudal másico se define como el peso de fluidos mezclados en kilogramos por hora (o toneladas) que pasan por y a través de los tubos. A medida que la caldera se hace más grande, es obvio que deben hacerse cálculos de diseño más complejos que consideren las distintas variables involucradas con los caudales másicos, tales como velocidades de flujo, zonas de presiones, temperaturas, calores específicos del fluido, conductividad, viscosidad, diámetro del tubo y superficies internas que pueden afectar al rozamiento o fricción del flujo a través del tubo. En comparación, las calderas antiguas de tubos de agua eran relativamente simples de diseño. La producción de todas las calderas de tubos de agua, como las de tubos de humos, está basada en los metros cuadrados de superficie de calefacción. Ésta es la suma de las áreas de superficie de calderines expuestos a los productos de la combustión, el área de todos los tubos así expuestos basada en su diámetro exterior y el

área agregada y proyectada de todos los cabezales o haces de tubos expuestos, así como las demás áreas y zonas especificadas por el código ASME. Las mínimas capacidades de la válvula de seguridad para calderas de tubos de agua se revisan en el capítulo sobre requisitos de la válvula de seguridad.

El código ASME requiere de los fabricantes para poder instalar, señalar o grabar en sus calderas la máxima capacidad de producción de vapor en libras por hora (en España, kg/hora) sobre las bases que sus diseñadores habían calculado (cálculos por masa de flujo). Es pues esencial familiarizarse con estas tasas de capacidad de producción estampadas cuando se trabaja con una caldera de tubos de agua para evitar sobrecargar la caldera por encima de su capacidad tarada.

CALDERAS DE CALEFACCIÓN DE TUBOS DE AGUA

Calderas de hierro fundido

La caldera de fundición es básicamente una caldera del tipo de tubos de agua, ya que el agua está dentro de las secciones de fundición (no tubos) y los productos de combustión están en el exterior. Pero a causa de las limitaciones del hierro fundido, el Código de calderas trata las calderas de fundición como un tipo especial, sin considerar el sistema de transferencia de calor empleado. Muchas calderas de fundición están estampadas por el fabricante como calderas de fundición de tubos de agua, lo que no debería malinterpretarse como clasificación del Código. Fundición es un término aplicado a muchas aleaciones hierro-carbono que pueden ser fundidas en un molde de una manera particular. Pero para las calderas de fundición se utiliza generalmente la fundición gris (acero fundido gris). Cuando la fundición se enfría lentamente en los moldes, parte del carbono se separa y cristaliza como grafito. Esto hace a la fundición gris menos frágil y más fácil de trabajar con máquinas herramientas. También cuando está aleada con níquel, cromo, molibdeno, vanadio o cobre se pueden conseguir propiedades y resistencias considerables. La práctica general es clasificar la fundición por clases:

Clase n.º	Tensión máxima lbs/in^2	Tensión máxima, kg/cm^2
20	20.000	1.400
25	25.000	1.750
30	30.000	2.100
35	35.000	2.450
40	40.000	2.800

Las calderas de fundición se construyen en diversas formas y tamaños, pero pueden agruparse en las tres clases siguientes:

1. Las calderas circulares de fundición (Fig. 3.22*a*) constan de una sección de hogar con base, una sección de coronación, una o dos secciones intermedias

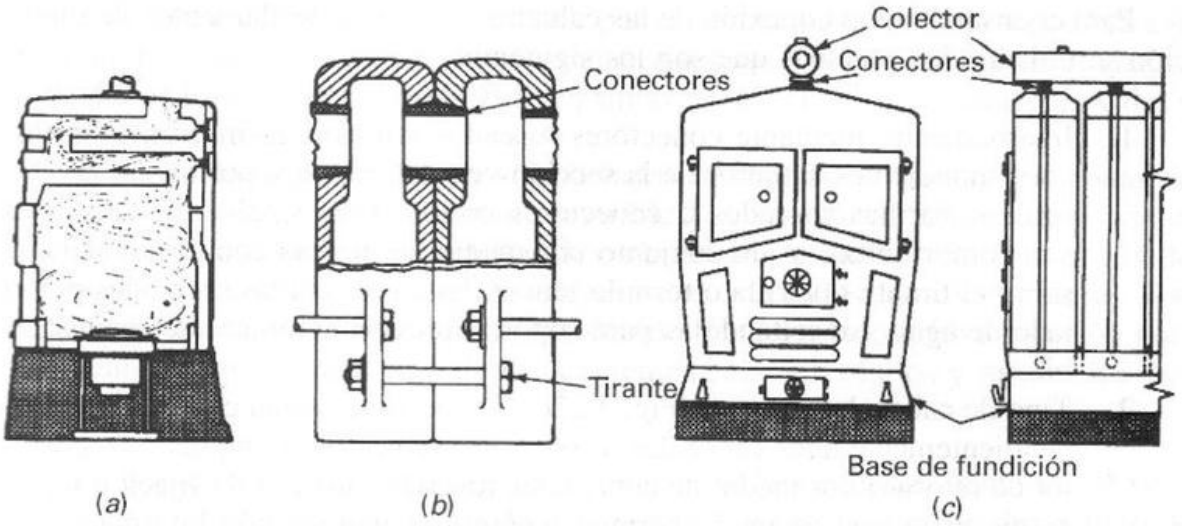


Figura 3.22. Tipos de calderas de fundición: (*a*) Unidad cilíndrica para suministro de Agua Caliente Sanitaria (ACS); (*b*) caldera por elementos (secciones) formada por elementos de fundición unidos por conectores y atirantados; (*c*) caldera con colector tipo de elementos unidos por conectores roscados.

y una parte superior o sección del domo. Las secciones constituyen un conjunto atornillado o cogido por tirantes y/o con casquillos o conectores de unión de las partes o secciones de agua. De ese modo el agua circula libremente a través de los conectores de sección en sección. El combustible se quema en el hogar central, con los gases subiendo y fluyendo a través de los diversos pasos de las secciones llenas de agua y finalmente salen por la chimenea. La caldera cilíndrica de fundición usada hasta popularizarse* para el servicio de suministro de agua caliente fue a menudo estampada como *hy-test* (comprobación máxima) para indicar una presión admisible de 7 kg/cm^2 para agua caliente sanitaria. Pero está siendo sustituida por calentadores de chapa de acero soldada calentados por combustibles o por electricidad.

2. Las calderas verticales de bloques o secciones constan de secciones ensambladas frontal con trasera y en posición vertical, atornilladas o unidas por medio de conectores roscados.
3. Las calderas por secciones horizontales consisten en secciones ensambladas como tostadas de pan (*pancakes*). Aquí cada sección queda perpendicular en relación a la base. Este tipo de acoplamiento o ensamblaje vertical puede complementarse con dos o tres conjuntos de caldera similares e interconectadas para ganar capacidad adicional. En esta disposición un cabezal común de impulsión y retorno se utiliza sin válvulas de seccionamiento entre secciones. Estas unidades se usan normalmente con gas y con un quemador para cada caldera o sección vertical múltiple.

* *N. del T.:* En Estados Unidos.

Para el ensamblaje o conexión de las calderas verticales de elementos de fundición se utilizan dos sistemas que son los siguientes:

1. Internamente, mediante conectores roscados y/o tirantes insertados en los correspondientes agujeros de la sección vertical. Esto es, por medio de tensores o varillas roscados o conectores cortos (Fig. 3.22*b*), las secciones son comprimidas en un conjunto por medio de tuercas contra arandelas y sobre el tirante o varilla o tornillo tensor. Esto conecta las secciones por el lado de agua, capacitándolas para soportar presión como secciones ensambladas.
2. Tipo de cabezales externo (Fig. 3.22*c*) las secciones están conectadas independientemente a los cabezales o colectores (colector de impulsión y colector de retorno) por medio de conectores roscados, tuercas de fijación y empalme. Este tipo de unión permite reemplazar una sección intermedia, ya que sólo tienen que retirarse tuercas, juntas y enlaces roscados de cada cabezal para desprender una sección de otra. En comparación con la construcción mediante tensores roscados, todas las secciones enlazadas y enfrentadas con la sección intermedia a reemplazar tienen que ser retiradas para llegar a la sección afectada.

Cuando se comprueban las calderas nuevas, es necesario inspeccionar el tipo de tuercas que aseguran los tirantes (redondos roscados). Si se usan tuercas de acero o cobre, deberían apretarse sólo a mano o a lo sumo reapretadas sólo unos pocos hilos de la rosca. La primera elección en calderas nuevas son las arandelas colapsables, con tuercas de cobre separadas. La segunda elección son las tuercas separadas de apriete manual (que rompen cuando tiene lugar una dilatación o tensión excesiva). En una caldera vieja, durante los meses de verano, localizada en su zona baja (basamento), hay que asegurarse de que las tuercas no están excesivamente apretadas. También conviene fijarse si los tirantes o tensores están oxidados en sus alojamientos, lo que puede afectar, por la tensión dada a las tuercas, a un posible estiramiento y rotura de los tensores. Obviamente, si los tensores están libres y las tuercas aflojadas, no habrá problemas de rotura por dilatación. Si el óxido crece y destruye los tensores hasta el límite de que se rompan, la caldera deberá desmontarse y limpiarse el óxido, examinando el estado de tensores y tuercas.

Las calderas tipo colector no tienen tensores o conexiones taladradas, de forma que nada tiene que atirantarse de modo que impida una expansión o dilatación anormal. Además del óxido, depositado entre secciones, el arranque rápido y brusco puede causar daños serios a estas unidades. Esté seguro de que las calderas viejas sin buenos dispositivos de purga no forman depósitos, porque ello producirá rotura. La restricción al suministro y circulación de agua puede también producirse por los depósitos calcáreos en estas unidades, dando como resultado un sobrecalentamiento.

Cuando los aparatos de control no están funcionando adecuadamente, o si la válvula de seguridad está obstruida o es de tamaño inadecuado, la caldera de fundición explotará. Muchas lo han hecho. La gran diferencia entre una explosión de caldera de chapa de acero y una explosión de caldera de fundición están que la caldera de fundición se fragmentará normalmente en trozos pequeños en la sección

afectada. Una caldera de chapa de acero, por el contrario, se romperá y perderá a lo largo de la chapa del calderín o envolvente. Así pues, volarán por los aires chapas curvadas de los paneles de acero. Pero en ambos casos, el peligro y daño para vidas y propiedades es muy grande.

En las calderas de fundición y modeladas de diferentes formas, las zonas de tensiones y los daños en ellas son imprevisibles; la geometría, factores de servicio, cegado por el lado de agua, depósitos de carbono, inquemados o cenizas en el lado de fuego y los cambios bruscos de temperaturas son todas causas de roturas. Así que nunca fallarán dos veces del mismo modo. Una cuidadosa investigación normalmente apunta a una o más de las siguientes causas de fallos y roturas inesperados:

1. Rápida introducción de agua fría en una caldera caliente, como puede ocurrir con un llenado realizado manualmente o incluso por un dispositivo de llenado automático.
2. Línea de alimentación conectada a un elemento o sección en vez de a la línea de retorno para atemperar el agua fría con el retorno de condensados o agua caliente (el Código exige que la realimentación de agua entre por la línea de retorno).
3. Mal funcionamiento de los aparatos de control y sobretensionado de la caldera bien por presión o temperatura.
4. Nivel de agua insuficiente en la caldera.
5. Concentración de depósitos internos, bloqueando la transferencia térmica u obstruyendo la circulación entre elemento y elemento.
6. Material defectuoso o fundición de la que no han trascendido sus datos hasta varios años posteriores al comienzo del servicio.
7. Montaje defectuoso o instalación inadecuada de la caldera en su alineación, paso, tensionado de tirantes, correcto acoplamiento de conectadores roscados, etc.

Caldera de tubos flexibles

La Figura 3.23 de la página siguiente muestra una caldera de tubos de agua (patente) flexibles fabricada en capacidades de hasta 3 toneladas/hora y presiones de hasta 25 bar para calefacción por agua caliente. Nótese que los tubos están curvados de diversas formatos de S, y esto proporciona una posibilidad de dilatación y contracción en dirección vertical con los cambios de temperatura. Los tubos son recambiables. Están insertados en los alojamientos de los colectores superior e inferior, y asegurados en los orificios por piezas de acoplamiento (perforadas). El final de cada tubo tiene un acoplamiento de acero soldado, que se dirige a la conexión del colector de acero o fundición. Se utilizan refuerzos y enderezadores de diversos modelos para evitar la pérdida de las piezas de acoplamiento de acero. Esta caldera pequeña de tubos de agua viene completamente montada de fábrica para una instalación más sencilla, principalmente para calefacción.

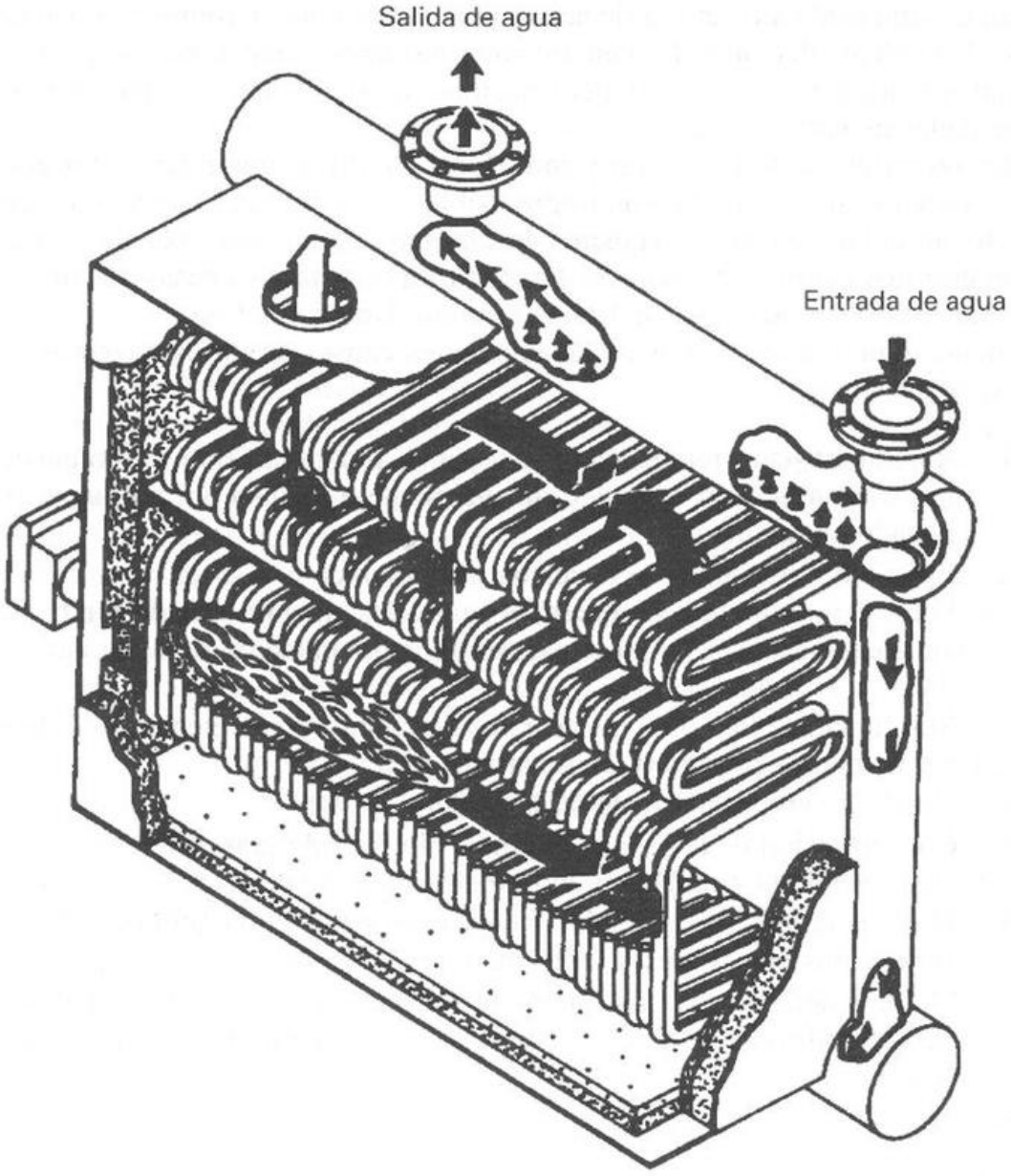


Figura 3.23. Características de la pequeña caldera de tubos de agua tipo en S patentada de tubos curvados o doblados para evitar el choque térmico en el servicio de agua caliente. (*Cortesía de Bryan Steam Corp.*)

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

1. ¿Por qué están mandrilados los tubos en una caldera de tubos de agua?

   RESPUESTA: Para añadir resistencia a los tubos laminados y evitar que tengan holguras y se salgan de los orificios donde se alojan al dilatarse y ensancharse debido al sobrecalentamiento causado por bajo nivel de agua u otras razones.

2. ¿Cuál es la diferencia entre una caldera de tubos de agua y una de tubos de humos (pirotubular)?

RESPUESTA: En la caldera piro tubular, los productos de la combustión pasan a través de los tubos y el agua los rodea. La inversa ocurre en el caso de las calderas de tubos de agua.

3. ¿Cómo se coloca un tubo nuevo en posición para su instalación en una caldera vertical de tubos de agua?

   RESPUESTA: A través de una de las aberturas manuales previstas para este propósito en la parte superior del calderín de vapor.

4. ¿Qué tipo de puerta de fuego se requiere en las calderas de tubos de agua? Explique su respuesta.

   RESPUESTA: El tipo de puerta de apertura hacia afuera o un tipo provisto de autocierre de un estilo que omita muelles o contacto de fricción, de forma que la puerta no sea abierta por soplo, en caso de rotura de tubos, o explosión del hogar y evite daños a personas que estén próximas.

5. ¿Están rebordeados o mandrilados en una caldera los tubos de agua rectos? Explique su respuesta.

   RESPUESTA: Están mandrilados por los extremos que no están en contacto con los gases calientes y no se ganaría nada por el achaflanado.

6. ¿A qué puntos o lugares están conectados los niveles en la mayoría de las calderas de tubos de agua?

   RESPUESTA: A las partes superior e inferior de un extremo del calderín principal de vapor.

7. ¿Cuántos pasos de humos (gases) hay en la caldera del tipo de tubo de agua más normal?

   RESPUESTA: Tres.

8. Explique el método a utilizar en la inspección de las condiciones de trabajo de un nivel visor de vidrio cuando están cerradas las válvulas en las conexiones a la caldera. ¿Qué impulsa al agua a retornar lentamente al interior del nivel?

   RESPUESTA: Primero cierre la válvula superior y purgue la columna de vidrio a través de la válvula de drenaje, con la válvula de conexión interior del nivel abierto. El agua subirá lentamente en el nivel a partir de la válvula de conexión inferior abierta. Después proceda a la inversa este proceso (invierta el proceso) cerrando la válvula o grifo de conexión inferior con la válvula superior de nivel abierta. Vigile la subida del agua en el cristal del nivel. Si el agua sube en el vidrio del nivel durante ambos procesos, indica que las conexiones no están obstruidas. Un pequeño retorno de agua al nivel indica obstrucción en la conexión de la columna de nivel o bien la parte inferior del nivel está obstruida. Esto puede comprobarse utilizando los grifos del nivel.

9. ¿Cuáles son la temperatura y presión máximas de trabajo permitidas en un nivel fabricado de hierro fundido y de acero maleable según el Código?

   RESPUESTA: Acero fundido: 17,5 bar y 232 °C; acero maleable: 34,5 bar y 232 °C.

10. ¿Cuál es la máxima y mínima proyección del tubo de un calderín que el tubo puede tener si se mandrila?

    RESPUESTA: Por el Código: 1/8″ (3,175 mm) de mínimo y 3/4″ (9,05 mm) de máximo.

11. ¿Cómo definiría usted un calderín de vapor en una caldera de tubos de agua utilizada para generación eléctrica en una central térmica?

RESPUESTA: Es una vasija o recipiente a presión en la cual el vapor se separa de la mezcla vapor-agua para dirigirse a la sección del sobrecalentador del generador de vapor para aumentar allí la temperatura del vapor.

12. ¿Cuál es la utilidad de un recalentador en las calderas de las centrales?

RESPUESTA: Un recalentador recibe vapor de la turbina de vapor después de que ha cedido parte de su calor original como energía en las etapas de alta presión de la turbina, y se recalienta a una temperatura más elevada en el generador de vapor y después retorna a las etapas de baja presión de la turbina para desarrollar más energía al accionar un generador eléctrico. La línea de vapor que lleva el vapor desde la turbina al recalentador se llama línea fría de recalentamiento, mientras la línea de vapor que lleva vapor recalentado desde el recalentador a la turbina se denomina línea caliente de vapor recalentado.

13. Defina el término «economizador».

RESPUESTA: Ésta es una sección absorbente de calor de una caldera grande de tubos de agua que precalienta el agua de alimentación para la caldera o generador de vapor, absorbiendo calor de la salida de gases al exterior.

14. ¿Cuáles son las ventajas de usar paredes de hogar tangentes en una caldera de tubos de agua?

RESPUESTA: Utilizando tubos tangentes, no se usan ladrillos refractarios propiamente dichos, sino un ladrillo aislante de poco espesor o fieltros aislantes con las paredes de tubos tangentes constituyendo el cerramiento del hogar, para asegurar el máximo efecto refrigerante y absorción uniforme de calor en la zona del hogar.

15. ¿Qué dispositivo de seguridad importante debe evaluarse cuando se cambia de combustible en una caldera?

RESPUESTA: Los combustibles tienen diferentes poderes caloríficos; por otra parte, la capacidad de las válvulas de seguridad debe comprobarse para estar seguro de que excede su capacidad de evacuación del potencial desprendimiento térmico y consiguiente mayor producción térmica del nuevo combustible.

16. ¿Porqué es necesario diferir el drenaje (o purga) de un generador de vapor hasta que se haya enfriado suficientemente?

RESPUESTA: Al enfriar hasta una temperatura segura antes del drenaje se evita el recocido de los lodos sobre las superficies interiores y también la hará más segura para que el personal pueda acceder a partes o zonas del generador de vapor para inspección y mantenimiento.

17. ¿Por qué debería evitarse que el trabajador trabaje en sobrepresión del hogar en aquellas unidades no diseñadas para trabajar con presión positiva?

RESPUESTA: La presión positiva del hogar inducirá a los gases calientes del hogar a escapar por los huecos y grietas en el ajuste o asentamiento de la caldera, produciendo polución en la sala de calderas y condiciones inseguras para el personal además de deterioro del ajuste o cierre de la caldera.

18. ¿Qué táctica de seguridad debería seguirse cuando se purga la caldera y el vidrio de nivel de agua no tiene visibilidad?

RESPUESTA: Debería situarse una persona en las proximidades del nivel para que fuera capaz de señalar a la persona que efectúa la purga y evitar la eventualidad de que el nivel de agua alcanzase un nivel inseguro (por ejemplo por debajo del mismo) de forma que el proceso de purga pueda interrumpirse inmediatamente.

19. Indique dos precauciones que hay que tener al usar los sopladores de hollín y cenizas por vapor.

RESPUESTA: Para evitar la erosión de los tubos, el vapor debería ser seco y el condensado debería drenarse de los sopladores antes de utilizarlos en el soplado de los depósitos de los tubos.

20. ¿Qué puede suceder si se rompe un *bafle*?

RESPUESTA: Los gases cortocircuitarían uno o más pasos de gases, resultando así temperaturas excesivas de los humos de combustión (o gases) y por ello pérdida de rendimiento y capacidad de producción de vapor (mayores pérdidas por calor sensible de humos en chimenea). También se producirían sobrecalentamiento y daños en las zonas de caldera diseñadas para temperaturas menores de los gases.

21. ¿Es la misma la capacidad volumétrica de cada paso de gases en una caldera de tubos de agua? Explique su respuesta.

RESPUESTA: No; disminuye en cada paso sucesivo. Los gases se contraen a medida que se enfrían y para mantener la elevada velocidad de los gases necesaria para no depositar las películas de gases y conseguir una buena transferencia térmica, el área de los pasos debe disminuir y los gases necesitan menos espacio.

22. ¿En qué tipo de caldera de tubos de agua se utilizan los tirantes tensores o separadores?

RESPUESTA: En los tipos de cajas o colectores planos.

23. ¿Qué es un conector de bajante?

RESPUESTA: Es una distancia corta de tubo de caldera situada entre el calderín de vapor y el cabezal, que dirige la circulación bajante del agua de caldera.

24. ¿Dónde se usan los conectores intermedios?

RESPUESTA: En las calderas de doble etapa donde se instalan dos conjuntos de cabezales; uno encima de otro. Los conectores intermedios los conectan verticalmente.

25. Señale las dos chapas principales de una caja cabezal.

RESPUESTA: La chapa tubular y la chapa del agujero de servicio (o tapa de tubo).

26. ¿Cómo se denomina la estrecha placa usada a veces para formar la parte superior de una caja-colector?

RESPUESTA: Cabezal.

27. ¿Cuántos puntos deslizantes hay en un calderín transversal? Explique su respuesta.

RESPUESTA: Normalmente uno, porque un asiento articulado o deslizante no debe interferir con la ligazón o punto fijo de amarre del cilindro.

28. ¿Qué es más difícil enderezar y trabajar: un tubo de una caldera de tubos de agua o de una caldera pirotubular?

RESPUESTA: Normalmente es más difícil en una caldera pirotubular, por la capa de depósitos y suciedades que habrá en la parte exterior del tubo.

29. ¿Cuántos calderines hay en una caldera Stirling de tubos curvados de agua?

RESPUESTA: Normalmente de dos a cuatro.

30. ¿Cuál es una ventaja de la caldera de tipo tubular de varios calderines? ¿Cuál puede ser una desventaja?

RESPUESTA: Las mayores capacidades de almacenaje de agua y vapor capacitarán a la caldera de varios calderines para cubrir las puntas en las fluctuaciones de carga con menos caída de presión. El coste adicional de los calderines puede ser la desventaja.

31. ¿Cuál es el calderín más corto en una caldera Stirling? Explique su respuesta.

RESPUESTA: El calderín inferior (de lodos) es el menor. Está suspendido por los tubos y los cabezales del calderín están dentro de las paredes de la caldera.

32. ¿El nivel de agua es el mismo en los calderines de una caldera de tubos curvados que en una caldera que tiene los calderines al mismo nivel?

RESPUESTA: Lo es cuando la caldera está aislada o trabajando a baja carga. A carga elevada, el nivel de agua en el calderín que suministra a los tubos bajantes es a menudo menor que en las otras calderas.

33. ¿Por qué razones están curvados los tubos de las calderas tubulares de agua?

RESPUESTA: Para permitir la dilatación y contracción; para permitir el recambio de los tubos; para posibilitar la entrada perpendicular de los tubos tangentes al calderín; para dar flexibilidad en el diseño respecto a presión y capacidad.

34. ¿Cuál es el objeto del muro puente en una caldera Stirling?

RESPUESTA: Protege el calderín de lodos de la exposición directa al calor de la llama.

35. ¿Qué puede suceder si el puente Stirling se rompe?

RESPUESTA: El asiento y costura longitudinal del calderín pueden sobrecalentarse y dañarse.

36. ¿Dónde está el agujero de hombre en los calderines de caldera de tubos curvados?

RESPUESTA: En, al menos, un cabezal de cada calderín.

37. ¿Cuál es el objeto de los tubos ecualizadores y de circulación en una caldera de tubos curvados?

RESPUESTA: Los tubos circuladores conectan el volumen de agua de los calderines adyacentes (normalmente del mismo nivel) y ayudan en la ecualización del nivel de agua. Los tubos ecualizadores conectan el espacio de vapor de estos calderines para igualar presiones de vapor.

38. ¿Cuál es la diferencia entre un calderín de lodos de una caldera Stirling y otra de tubos de agua rectos?

RESPUESTA: Un calderín de lodos Stirling es uno de los calderines básicos del sistema de circulación. En las calderas de tubos rectos, el calderín de lodos puede ser un paso del calderín de vapor (caldera Heine) o una caja externa en la parte inferior de los cabezales (como en la caldera Babcock y Wilcox).

39. ¿Dónde están las conexiones de purga en las calderas de tubos curvados y cuántas hay?

RESPUESTA: En la parte inferior del calderín de lodos o calderín inferior; una o más, dependiendo de la longitud del calderín.

40. ¿Cuál es la diferencia entre la chapa tubular en una caldera de tubos curvados y en una caldera HRT (de retorno tubular horizontal)?

RESPUESTA: En la caldera de tubos curvados, la chapa tubular es aquella parte del calderín en la cual se conectan los tubos. En la caldera de retorno tubular horizontal la chapa tubular es la chapa plana de un cabezal.

41. *a*) Defina el sobrecalentador de una caldera de vapor.
b) Indique dos modos diferentes de producir vapor sobrecalentado.

RESPUESTA:

a) Sobrecalentador es una variante de calentador utilizado para elevar la temperatura del vapor saturado por encima de la temperatura debida a su presión. Normalmente consta de un cabezal de entrada y un cabezal de salida, con un haz tubular de interconexión.
b) Uno calentando separadamente y el otro del tipo localizado y situado en el asentamiento de la caldera o paredes de cierre de la misma y a veces en las paredes del hogar.

42. *a*) Defina un precalentador de aire y mencione algunas ventajas obtenidas al utilizarlo como parte del generador de vapor.
b) Defina las paredes refrigeradas por aire usadas en las instalaciones de calderas y qué se gana con su utilización.

RESPUESTA:

a) Un precalentador de aire es un intercambiador de calor normalmente instalado en la chimenea de gases o en el pantalón correspondiente de la caldera. El aire frío entrante se calienta por los gases de salida, que de otro modo serían desperdiciados, y el aire precalentado se usa de nuevo en el hogar, ahorrando el combustible o el calor necesario para calentar ese aire.
b) Las paredes refrigeradas por aire están en la zona del hogar. El aire frío preserva los refractarios del hogar de la combustión y el aire actúa como aislante para evitar pérdidas a través de los mismos refractarios de la caldera.

43. ¿Qué es una caja de viento en una caldera de tubos de agua?

RESPUESTA: Es una cámara que rodea las toberas y quemadores donde se suministra el aire precalentado bajo ligera sobrepresión para la combustión.

44. ¿Cómo circula el agua y el vapor en una caldera de tubos de agua rectos?

RESPUESTA: Este tipo de caldera tiene una circulación natural con el agua y el vapor subiendo a lo largo de los tubos inclinados al colector frontal elevado, después a través de los montantes hasta el calderín. El agua circula a través de la bajante y a través del colector trasero a los tubos inclinados hasta completar el ciclo.

45. Nombre dos clasificaciones utilizadas para describir los cierres del hogar de las calderas de tubos de agua.

RESPUESTA: Las dos clasificaciones son las de los cerramientos de hogar que constan principalmente de refractarios para mantener el calor dentro del hogar y la de los hogares con paredes refrigeradas por agua.

46. ¿Cuál es normalmente la parte más débil (desde el punto de vista de construcción) de una caldera de tubos curvados?

RESPUESTA: La conexión del tubo. Véase el Capítulo 9 sobre cálculos de tensiones.

47. ¿Cuáles son los tipos de tubos que se utilizan en las calderas de tubos de agua?

RESPUESTA: Las condiciones de trabajo han impulsado a los fabricantes a buscar nuevas soluciones a los problemas de operación de las calderas, tales como la combustión agresiva o los combustibles corrosivos en el hogar. Véase la Figura 3.24. Los tubos fabricados para estas condiciones especiales de trabajo incluyen:

a) Los tubos sin soldadura para servicio ordinario hechos de acero al carbono estirado (laminados) en frío o en caliente. El rango de espesor varía desde 1,24 mm como mínimo hacia arriba.
b) Tubos de acero al carbono soldados según requerimientos del Código con espesores también partiendo desde 1,24 mm como mínimo.
c) Aceros aleados y aceros inoxidable laminados en caliente o en frío desde un espesor mínimo de 1,24 milímetros.
d) Tubos bimetálicos, como se ven en la Figura 3.24*a*, que tienen un tubo exterior de acero inoxidable rodeando a otro tubo concéntrico interior de acero al carbono, que está diseñado para resistir la presión de trabajo, mientras el tubo exterior de acero inoxidable proporciona resistencia a la corrosión y a la erosión. Estos tubos fueron desarrollados para ser usados en calderas de recuperación de la industria papelera, pero también están siendo utilizados en las instalaciones de combustión de desperdicios y servicios similares de combustión corrosiva.
e) Tubos ribeteados, como se muestra en la Figura 3.24*d*, están siendo utilizados para incrementar la circulación y así evitar DNB, o inicio para la evaporación nucleada. Esta tubería tiene un ribeteado interior en espiral.
f) Los tubos aleteados externamente son utilizados mucho para la confección de paredes membrana en las calderas de tubos de agua. Véase la Figura 3.24*e*. Esta fabricación elimina la soldadura de barras o aletas a los tubos para formar una pared membrana; los tubos son fabricados como se muestra. Sólo las aletas se sueldan o ensamblan en conjunto para formar normalmente una pared de hogar estanca.

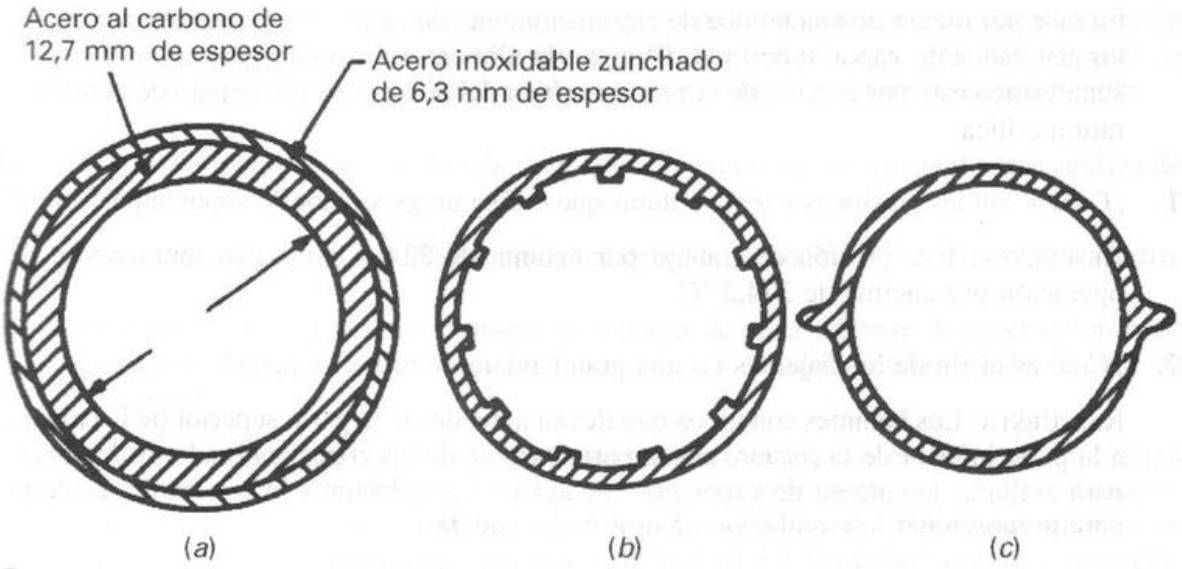


Figura 3.24. Tubos especiales de calderas de tubos de agua que se utilizan para diversos servicios operativos. (*a*) Tubos bimetálicos para resistir corrosión y erosión del hogar de algunas calderas. (*b*) Tubos ribeteados para incrementar la circulación natural. (*c*) Tubos aleteados exteriormente para conectarse y formar paredes-membrana, y también en calderas de recuperación de calor, para aumentar las superficies de transferencia o intercambio térmico.

48. Explique las ventajas de los sobrecalentadores y recalentadores drenables.

RESPUESTA: Los sobrecalentadores y recalentadores del tipo drenable permiten establecer el flujo a través de los tubos en el arranque de las calderas grandes, y así evitar el posible recalentamiento del tubo. El tipo drenable también permite mejor limpieza química de los tubos del sobrecalentador y recalentador al asegurar que la solución química circule uniformemente a través de los tubos del circuito. Esto permite una mejor neutralización y lavado con productos químicos, y la limpieza de los residuos depositados cuando el lavado químico está realizado.

49. ¿Qué significa el término «tasa de subida» o «rampa de subida» en una caldera?

RESPUESTA: Es la tasa de aumento de presión y temperatura por unidad de carga permisible y recomendada por el fabricante de la caldera. Esto es especialmente aplicable a las calderas de centrales térmicas. Los cambios excesivos de carga, con los correspondientes cambios de temperatura y de presión, añadirán tensiones adicionales en los componentes de la caldera. La temperatura del metal aumenta debido a las rápidas tasas de incremento de carga, y pueden incrementar la temperatura del metal del sobrecalentador y recalentador por encima de la de diseño, y esto finalmente puede producir roturas o fallos.

50. ¿Cuál es la diferencia entre un generador de vapor de circulación «unitaria» (de una vez) y un generador supercrítico?

RESPUESTA: Los dos términos se aplican a los generadores de vapor supercríticos, donde el agua va a través de los tubos sólo «una vez» en contraste a la circulación natural donde el líquido puede circular a través de los tubos más de una vez antes de convertirse en vapor. El fluido en un generador de vapor de circulación «única» está en circulación

forzada por medio de una bomba de circulación, en contraste a la circulación natural en un generador de vapor subcrítico. El agua de alimentación en un generador de vapor supercrítico está por encima de la presión crítica del agua, pero por debajo de la temperatura crítica.

51. ¿Cuáles son las presiones y temperaturas que define un generador de vapor supercrítico?

RESPUESTA: Una presión de trabajo por encima de 224'4 bar y una temperatura de operación por encima de 374,2 °C.

52. ¿Cuál es el fin de los bajantes en una gran caldera de tubos de agua?

RESPUESTA: Los bajantes son tubos que llevan agua desde la parte superior de la caldera a la parte inferior de la misma, por la parte externa de las zonas generadoras de vapor, para asegurar la entrega de vapor libre de agua a los colectores interiores del calderín para proporcionar la circulación natural de la caldera.

Calderas de serpentín (o batería tubular)

53. ¿Qué limitaciones pone el Código en las calderas de agua caliente de serpentín que no tienen espacio o volumen de vapor?

RESPUESTA: El Código no cubre este tipo de calderas si se cumplen con las siguientes restricciones: (1) tuberías de 3/4" (19 mm) de diámetro sin calderines o cabezales conectados a ella; (2) máxima capacidad del contenido de agua de 6 galones (27 litros); (3) que no se genere vapor en el serpentín.

54. Cite dos razones por las cuales una caldera tipo serpentín puede desarrollar temperatura excesiva en el serpentín.

RESPUESTA: Poco agua y agua insuficiente que está circulando a través del serpentín a causa de obstrucción parcial o fallo de la bomba. Por esta razón, las calderas tipo serpentín deberían tener un dispositivo de seguridad por temperatura elevada y un mecanismo de corte de caudal que cortase el combustible cuando se produjesen temperaturas elevadas en el serpentín. Esto se cumple normalmente con un dispositivo termostático.

55. ¿Cómo se controla la alimentación de agua en una caldera tipo Clayton de serpentín?

RESPUESTA: La alimentación de agua se controla por medio del control de nivel de agua, que a su vez responde al nivel de líquido existente en el acumulador. Cuando el nivel de agua en el acumulador desciende, el solenoide de la bomba de agua se activa para permitir operar a la bomba de alimentación de agua.

56. ¿Qué sistema se recomienda para comprobar fugas en una caldera tipo serpentín?

RESPUESTA: La mayoría de los fabricantes recomiendan probar la caldera hidrostáticamente; si la fuga es pequeña, repararla mediante un proceso de soldadura aprobado. El serpentín debería cambiarse si se encuentran dificultades en la reparación.

Calderas de Fundición

57. ¿Una caldera de hierro fundido necesita tubería y válvula de purga?

RESPUESTA: Sí. El código ASME requiere que toda caldera tenga una conexión tubular de purgado conectada con una válvula o grifo de no menos que 3/4" (19,05 mm) de diámetro. Debe estar conectada con el espacio inferior o nivel de agua practicable.

58. ¿Cuál es el menor diámetro de tubería requerido para conectar un nivel a una caldera de calefacción de vapor?

RESPUESTA: El diámetro mínimo de tubo no debe ser menor de 1" (25,4 mm) de diámetro.

59. ¿Qué prueba hidrostática se requiere en caldera de agua caliente de calefacción o de agua caliente sanitaria construida en fundición y trabajando a una presión de más de 2,9 kg/cm^2?

RESPUESTA: Cada sección o elemento de una caldera de fundición debe someterse a una prueba hidrostática de 2,5 veces la presión máxima permisible; en el taller donde se fabrica. Las calderas de fundición taradas para presiones de trabajo por encima de 2,8 kg/cm^2 deben someterse a prueba hidrostática de 1,5 veces la presión máxima permisible en campo (donde se instalan y quedan listas para servicio). Una vez que la caldera está en servicio y se precise prueba hidrostática, la prueba será verificada a 1,5 veces la presión máxima permisible.

60. Indique los dos controles de presión requeridos en una caldera de calefacción a vapor y los controles de temperatura requeridos en una caldera de calefacción de agua caliente.

RESPUESTA: Las calderas de vapor automáticas requieren un dispositivo de corte por presión ajustado por debajo de la presión permisible y un corte por límite superior ajustado a una presión no superior a 1,05 kg/cm^2. Para calderas de calefacción se requiere un dispositivo de corte operado a una temperatura menor que la permisible, así como un dispositivo de corte por límite superior a no más de 121 °C.

61. ¿Cuándo exige el Código de calderas de calefacción un corte de combustible por bajo nivel de agua para las calderas de agua caliente?

RESPUESTA: Cuando la caldera es automática y de potencia superior a 100.000 kcalorías/hora.

62. ¿Qué pruebas hidrostáticas se requieren en los elementos de fundición de una caldera de calefacción a vapor por elementos?

RESPUESTA: Los elementos individuales deben probarse a una presión hidrostática no menor de 4,2 kg/cm^2. El conjunto montado debe probarse a una presión hidrostática no inferior a 3,15 kg/cm^2.

63. ¿Qué pruebas hidrostáticas se precisan para una caldera de fundición para utilizarla como caldera de calefacción de agua caliente?

RESPUESTA: Para calderas con presión de trabajo no superior a 2,1 kg/cm^2, la presión hidrostática debe ser al menos de 4,2 kg/cm^2 para cada elemento individual. Aquellas que trabajan con presiones superiores a 2,1 bar requieren una presión de prueba de 2,5 veces la presión máxima permisible en cada elemento o sección. En ambos casos, los elementos montados y la caldera así formada requieren otra prueba hidrostática no menor de 1,5 veces la presión máxima de trabajo permitida. Estos requisitos se aplican al fabricante de calderas de fundición. Las presiones de prueba requeridas deben controlarse dentro de un margen de 0,7 kg/cm^2.

64. Cite los tres sistemas o tipos de calderas de fundición.

RESPUESTA: De secciones horizontales, de secciones o elementos verticales y el tipo de una sola pieza.

65. ¿Qué estampillado o marcaje requiere el código ASME en las calderas de fundición?

RESPUESTA: La marca o estampillado debe constar de los siguientes apartados: nombre del fabricante; presión máxima permisible en kg/cm^2 (o psi en EE. UU.) y capacidad en kg/hora (libras/hora) para vapor y kcalorías/hora para servicio de agua caliente.

66. ¿Cuál es el menor tamaño de válvula de seguridad permitida en una caldera de fundición para utilizarse en servicio de vapor o de agua caliente en calefacción?

RESPUESTA: El Código ASME requiere una válvula de seguridad mínima de 3/4" (20 mm) de diámetro para ambas calderas: de vapor y de agua caliente del tipo de fundición.

67. ¿Qué aumento de presión está permitido en una caldera antes de que la capacidad de la válvula de seguridad pueda considerarse inapropiada en calderas de calefacción?

RESPUESTA: Para calderas de calefacción de vapor la capacidad de la válvula de seguridad deberá ser suficiente para que, al máximo de combustible, la presión no suba más de 0,35 kg/cm^2. Para las calderas de agua caliente, la capacidad de la válvula de seguridad debe bastar para evitar que la presión suba más de 0,7 kg/cm^2 con los quemadores trabajando a la tasa de combustión máxima.

Capítulo 6

ESTRUCTURA DE LOS MATERIALES, CÓDIGOS Y ESPECIFICACIONES REQUERIDAS DE LOS MATERIALES

SECCIONES DEL CÓDIGO ASME DE CALDERAS

En el código ASME de calderas, Sección II, titulada «especificaciones de materiales», hay requerimientos extensos y detallados de los materiales, pruebas y notas. Hay cuatro partes en esta sección:

Parte A: Materiales ferrosos.
Parte B: Materiales no ferrosos.
Parte C: Varillas de soldadura, electrodos y material de relleno.
Parte D: Tablas de tensiones admisibles para cálculos de resistencia del código de calderas.

Las especificaciones de la Sección II son similares a las publicadas por la ASTM (Sociedad americana para pruebas y materiales) y a las especificaciones de los materiales de soldadura publicadas por la AWS (Sociedad americana de soldadura).

La Sección I detalla el material que debe utilizarse para las calderas de potencia. Otras secciones, que incluyen las calderas de calefacción, recipientes a presión no calentados y componentes nucleares, tienen su propio listado de materiales permisibles para las piezas consideradas.

Se han hecho previsiones en la Sección I para el uso de materiales no identificados con una especificación como la listada en la Sección II; sin embargo, deben satisfacerse ciertas condiciones como la recertificación por una parte «neutral» de que el material es equivalente al permisible listado, incluyendo que se han cumplido sus análisis químicos y propiedades mecánicas y sus requerimientos sobre dureza.

Se requiere que el proveedor entregue al fabricante de calderas y al inspector oficial la documentación completa.

Este capítulo suministra material metalúrgico introductorio y ciertas definiciones expresadas en el Código que son aplicables a la construcción y reparación eventual de calderas. Su propósito principal es introducir al lector en los diversos materiales de construcción y soldadura que precisan control de calidad de forma que sólo se usen materiales permitidos por el Código. Los textos metalúrgicos deberían consultarse para un mejor estudio con respecto a las propiedades de los materiales, su estructura cristalina y cómo son afectados con los procesos de fabricación.

Aleaciones ferrosas. La mayoría de las piezas a presión de las calderas están hechas de aleaciones ferrosas, lo que significa que están fabricadas de hierro y aleaciones a partir de hierro. Excepto las calderas de fundición y algunas especiales de calefacción, todas las demás normalmente tienen piezas de acero unidas por soldadura de fusión. Hay una demanda creciente para presiones de servicio más elevadas, lo que requiere materiales mejores y mejores tecnologías de fabricación. Esto se está consiguiendo mediante aleaciones sofisticadas, desgasificado al vacío en los procesos de fabricación del acero, tratamientos térmicos múltiples, ensayos y extensión de técnicas no destructivas y altos niveles y normas de control de calidad por citar unos pocos métodos que están siendo utilizos para obtener materiales mejores. El control de calidad de los procedimientos de soldadura utilizados y el control de la operación de soldadura han sido mejorados materialmente por el mayor énfasis dado a las especificaciones más restrictivas y requerimientos de inspección y documentación.

ESTRUCTURA MATERIAL

Si una pieza de metal se pule cuidadosamente, se sumerge por un corto período de tiempo en un ácido u otro reactivo adecuado y después se examina bajo un microscopio, se encontrará que está compuesta de pequeñas partículas o cristales. El metal, en vez de ser perfectamente uniforme, está formado por estas pequeñas unidades de materia.

Los materiales que parecen ser perfectamente homogéneos, en realidad están compuestos por un agregado de granos o cristales de materiales diferenciados. Una pieza de material tendrá por otra parte diferentes propiedades en diferentes puntos de su estructura. Incluso los metales puros están formados por un agregado de cristales que tienen diferentes propiedades en diferentes direcciones.

Un método conveniente para explicar algunas de las semejanzas y diferencias en las características de los metales es el de estudiar la disposición de los átomos en el material.

Matriz espacial. Un cristal de un metal determinado está compuesto por átomos dispuestos en un modelo geométrico definido y regular. Este modelo se conoce como matriz espacial y se determina mediante estudios de rayos X. Los átomos en un hierro o acero a *temperatura ambiente*, por ejemplo, están dispuestos en una matriz cúbica centrada. Esto es, los átomos están situados como en los vértices de un cubo, con un átomo en el centro, como se indica en la Figura 6.1*a*1. Este modelo se repite a sí mismo a través de una sola imitación, como se indica en la Figura 6.1*a*2.

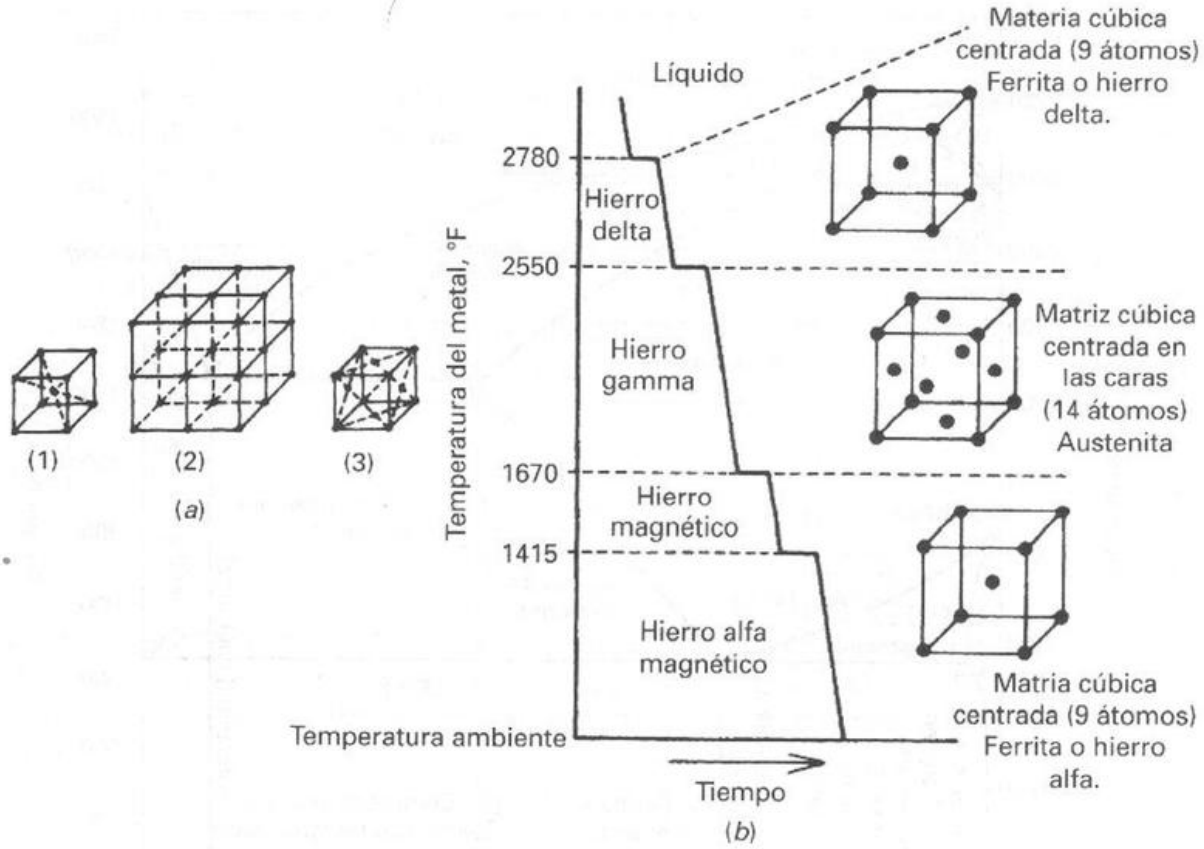


Figura 6.1. (*a*) Los átomos del metal están dispuestos en matrices espaciales como sigue: (1) Matriz cúbica centrada. (2) Unidades cúbicas cristalinas. (3) Matriz cúbica centrada en las caras. (*b*) Formas cristalinas del hierro a diferentes temperaturas.

Dos cristales adyacentes en una barra de hierro o acero tendrán la misma formación matricial, pero su orientación o las direcciones de los ejes de la matriz espacial serán diferentes. El cromo, vanadio, molibdeno y tungsteno también tienen la matriz cúbica centrada.

El hierro a alta temperatura cristaliza en una matriz cúbica centrada en las caras del cubo, o con un átomo en cada vértice y otro en el centro de cada cara, como se ilustra en la Figura 6.1*a*3. Hay un total de 14 sistemas matriciales.

Un metal puro cristaliza al enfriarse a través de su punto de solidificación; si un núcleo está presente, la cristalización consiste en el crecimiento de cristales alrededor de un núcleo en el punto de solidificación del metal. Una vez que se establece un núcleo en un metal líquido puro o por debajo del punto de solidificación, los átomos del material líquido comienzan a agregarse al núcleo. Los átomos se depositan a lo largo de direcciones definidas del cristal o matrices espaciales.

Un estudio de la matriz espacial o de las formaciones cristalinas que se crean cuando los metales se enfrían y solidifican a sus temperaturas de solidificación, ayuda a determinar los efectos de las aleaciones, velocidad de enfriamiento y consideraciones metalúrgicas similares. El hierro, por ejemplo, se transforma en varios tipos de cristales, y las correspondientes disposiciones de las matrices espaciales para estos tipos son las siguientes:

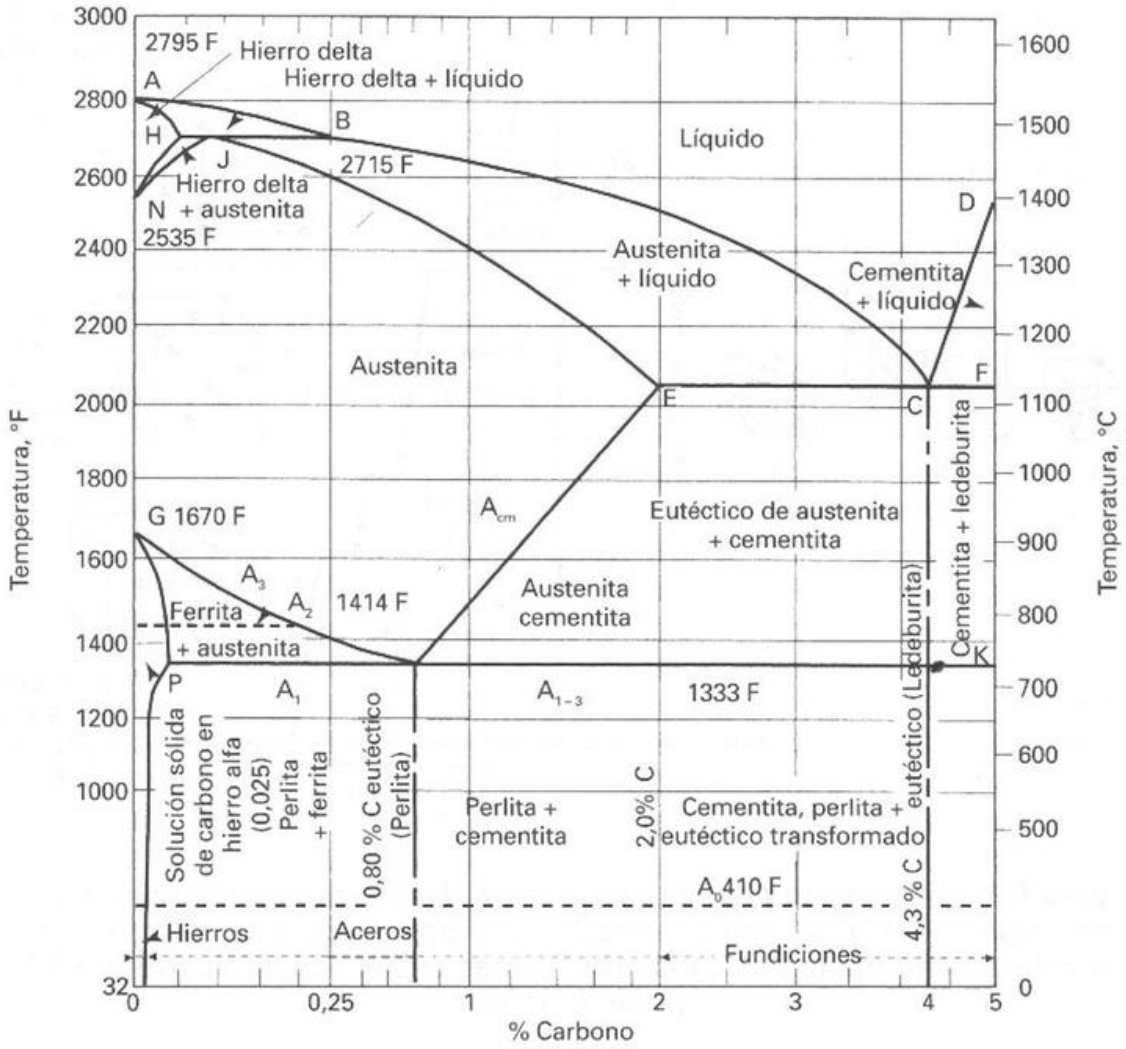


Figura 6.2. Este diagrama de equilibrio hierro-carbono muestra los límites de solubilidad del carbono en hierro. Los porcentajes de cada adición hasta el 100 % en la parte baja del gráfico; por ejemplo, 5 % carbono, 95 % hierro.

Tipo de hierro	Tipo de estructura cristalina
Hierro alfa, delta y ferrita	Matriz cúbica centrada (BCC)
Hierro gamma y austenita	Matriz cúbica centrada en las caras (FCC)

El hierro alfa alcanza la estructura BCC por debajo de 1.670 °F (910 °C)
El hierro delta y la ferrita con la estructura BCC existen por encima de 2.534 °F (1.390 °C)
El hierro gamma y la austenita con la estructura FCC existen entre 1.370 °F y 2.534 °F

A temperatura ambiente el hierro se compone de una matriz cúbica centrada en el cubo (véase la Figura 6.1*b*). En esta forma se le conoce como hierro alfa o ferrita alfa y es blando, dúctil y magnético. Sobrecalentando por encima de unos 1.415 °F (768,3 °C), el hierro alfa pierde su magnetismo pero conserva su estructura cristalina centrada en el cubo. Esta estructura cambia a cúbica centrada en las caras a aproximadamente 1.370 °F (910 °C), a cuya temperatura el hierro alfa se transforma

en hierro gamma y permanece no magnético. Continuando con el aumento de temperatura, ocurre otro cambio de fase a los 2.570 °F (1.410 °C) cuando se forma el hierro delta. Este último es idéntico en estructura cristalina (centrada en el cubo) a la del hierro alfa de baja temperatura. Es magnético y estable en su punto de fusión. No hay cambios de fase conocidos en la forma líquida (por encima de los 2.800 °F (1.538 °C). Al enfriar muy lentamente desde el estado líquido los reagrupamientos atómicos descritos antes suceden en orden inverso. Una diferencia de entre un 2 y un 3 por 100 del contenido de carbono, una diferencia en el tratamiento térmico y una diferencia en la cantidad de trabajo o energía mecánica durante el proceso de conformación pueden ocasionar que varíe la resistencia final del 0,1 por 100 al 50 por 100, y el límite elástico puede variar de 10.000 a 270.000 psi (700 a 18.900 kg/cm^2).

Las variaciones en resistencia, ductilidad y otras propiedades de una aleación hierro-carbono pueden explicarse haciendo referencia al diagrama típico de equilibrio para una parte del sistema hierro-carbono, como se muestra en la Figura 6.2. El rango de temperaturas se ilustra desde 0 a 1.535 °C (2.795 °F), punto de fusión del hierro puro. La proporción de carbono contenido va del 0 al 5 por 100, representando el rango o variedad de materiales a utilizar. Las aleaciones que contienen más del 5 por 100 de carbono son demasiado frágiles y débiles. El hierro bruto (arrabio) contiene entre el 0 y el 0,12 por 100 de carbono; el acero, entre el 0,12 y el 1,7 por 100; y la fundición, más del 1,7 por 100.

La Figura 6.2 representa los cambios de fase que ocurren en las aleaciones hierro-carbono a las temperaturas indicadas. Hasta aproximadamente un 4,3 por 100 de carbono presente en la solución, cualquier adición de carbono hace bajar el punto de fusión de la aleación.

Los metalurgistas utilizan los diagramas de equilibrio de las aleaciones para predecir cambios que pueden ocurrir con la temperatura a medida que la aleación precipita o solidifica. En la Figura 6.2, el enfriamiento de las aleaciones hierro-carbono tiene lugar a temperaturas como las mostradas por la línea de líquido ABCD. El contenido de carbono hasta el 2 por 100 va en solución sólida en el hierro. Si el contenido de carbono es mayor del 2 por 100 el exceso líquido forma un eutéctico con un compuesto de hierro y carbón. Los metalurgistas pueden predecir a partir de un diagrama de equilibrio qué fase de aleación estará a diferentes temperaturas basada en el porcentaje de contenido de la aleación.

En aceros al carbono, sólo pueden estar presentes tres fases en el estado sólido bajo condiciones de equilibrio:

Austenita: Es una fase de los aceros que consiste en la forma de hierro gamma con carbono en solución sólida. La austenita es no magnética y tiende a endurecerse cuando se trabajan en frío estos aceros austeníticos a temperaturas ordinarias.

Ferrita: Es hierro puro.

Cementita: Es carburo de hierro, Fe_3C, formado cuando el hierro y el carbono se combinan químicamente a alrededor de los 1.274 °F (690 °C).

En soldadura tienen lugar la fusión y solidificación, y los metalurgistas estudian el efecto que esto puede tener sobre las aleaciones. La Figura 6.2 representa las condiciones que pueden existir en una aleación hierro-carbono sin ningún otro elemento de aleación. Un aumento en la velocidad de enfriamiento del material de la aleación por inmersión en aceite o agua o la adición de otro elemento de aleación

como níquel, silicio o cromo puede dar como resultado un diagrama de equilibrio (ternario en vez de binario) distinto del mostrado en la Figura 6.2.

El tamaño de los cristales y la dispersión del carbono en el hierro afecta también a las propiedades del acero al carbono. Por ejemplo, pequeños cristales de carbono muy dispersos tienden a aumentar la resistencia y la dureza. La *finura del grano* es la reducción de la estructura cristalina por medio del tratamiento térmico o por una combinación del tratamiento térmico y trabajo mecánico. Los tamaños específicos de los granos pueden alcanzar el tamaño *grueso* (1 a 5) o *fino* (5 a 8) en las especificaciones del acero. La prueba de McQuaid-Ehn se usa para especificar los tamaños de los granos de un acero según las especificaciones de estructura metalúrgica en la Sección II, Materiales ferrosos.

Temperatura de transformación. En los aceros al carbono, sólo pueden presentarse tres fases en estado sólido en condiciones de equilibrio: *austenita*, *ferrita* y *cementita*. El intervalo de temperatura dentro del cual se forma la austenita y también el intervalo de temperatura dentro del cual desaparece al enfriar, se llama rango o intervalo de temperatura de transformación. Las transformaciones al calentar no tienen lugar a las mismas temperaturas que al enfriar excepto si se dan velocidades infinitamente lentas de cambio de temperatura. Las temperaturas de transformación dependen del contenido de carbono de acuerdo con los diagramas de equilibrio.

Efectos del recalentamiento. En general, los efectos del recalentamiento de un metal son los inversos de los obtenidos en el enfriamiento lento. Por ejemplo, un acero conteniendo 0,2 por 100 de carbono y compuesto de perlita y ferrita se transforma en austenita, ya que el hierro alfa se transforma en hierro gamma en el rango crítico. Sin embargo, para este acero las temperaturas de transformación son alrededor de 86 °F (30 °C) más altas en el calentamiento que en el enfriamiento lento. Los cambios en el contenido de carbono y la presencia de otros elementos de aleación afectan al diferencial de temperatura.

A causa de lo que indican los efectos de las diferentes velocidades de enfriamiento, las isotermas y los diagramas continuos de transformación son utilizados a veces por los metalurgistas para predecir los resultados de los diversos procesos de soldadura. En la soldadura de acero al arco, la estructura puede variar desde ferrita a martensita, dependiendo de las condiciones de soldadura. En la soldadura por puntos se obtienen grandes cantidades de martensita y es esencial un tratamiento térmico posterior a la soldadura si el contenido de carbono es mayor que aproximadamente el 0,25 por 100. Un diagrama de transformación indicará aproximadamente el tipo de microestructura en la zona adyacente de la soldadura. El tipo de microestructura deseado indicará también el proceso de soldadura más adecuado a utilizar.

CONTROL DE LAS PROPIEDADES DEL HIERRO FUNDIDO Y DEL ACERO

Alto horno. El primer paso en la producción de fundición y acero es la extracción del hierro de los minerales para hacer hierro bruto o arrabio. Esto se realiza en el alto horno (véase la Figura 6.3).

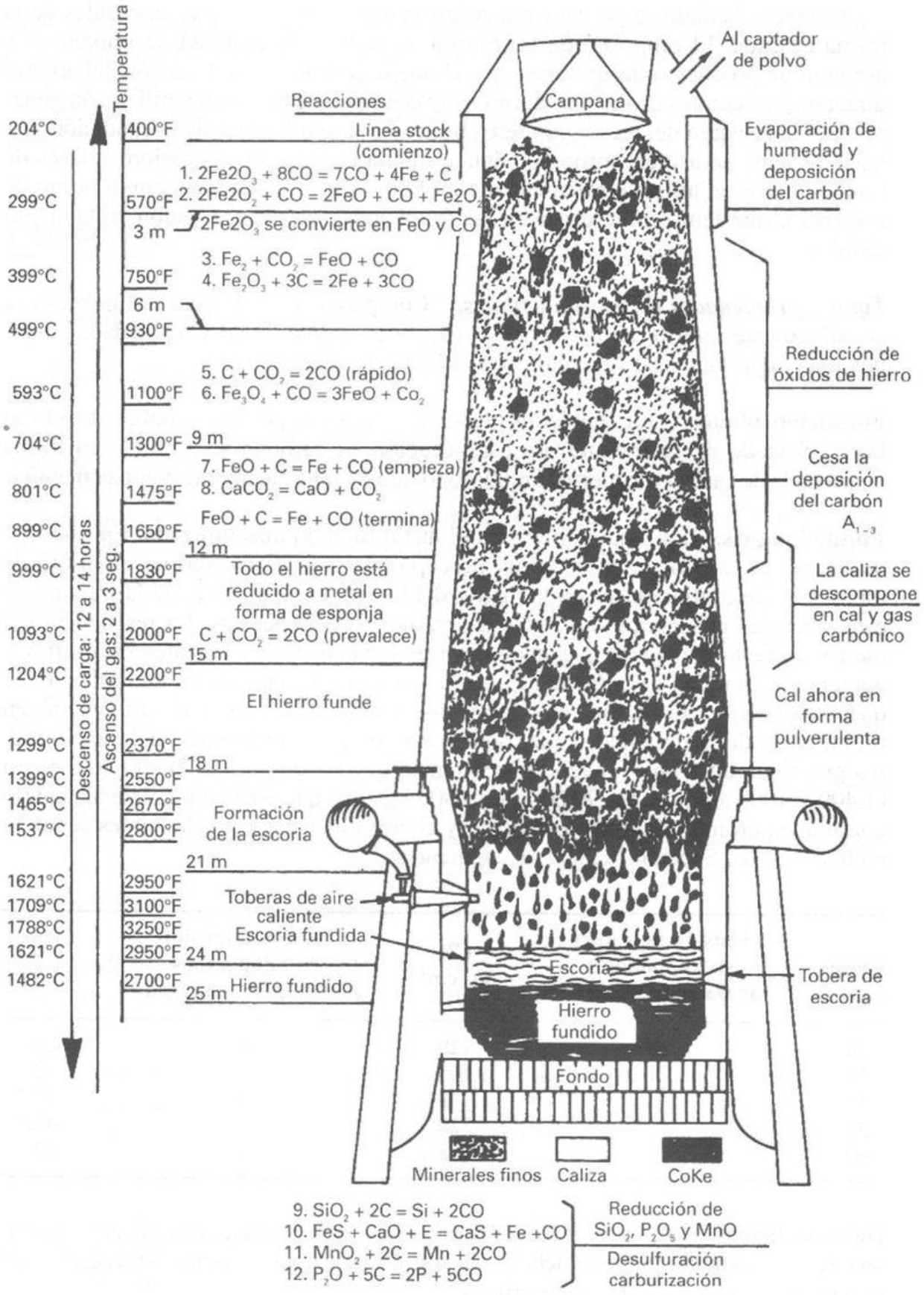


Figura 6.3. Reacciones en un alto horno para hacer fundición del mineral de hierro. (*Cortesía de CF&I Steel Corp.*)

El hierro fundido se produce por refusión del arrabio y colada en moldes de la forma deseada. El propósito de la refusión es reducir la cantidad de impurezas y asegurar un producto más uniforme que el que se obtendría por la fusión del arrabio directamente como sale del alto horno. Hay dos tipos de hornos de utilización general para la refusión del arrabio o hierro bruto. En la producción de la fundición gris más corriente se usa un horno de cúpula, mientras que para las mejores clases de fundición gris se utiliza corrientemente un horno de aire, conocido como horno de reverbero, que también se usa para las fundiciones que van a recibir tratamiento térmico.

Tipos y propiedades de las fundiciones. Comparada con el acero la fundición es decididamente inferior en resistencia, maleabilidad, ductilidad y tenacidad. Los tipos más importantes de fundición son la blanca y la gris.

Fundición blanca. La fundición blanca es conocida por ese nombre debido al lustre plateado de su fractura. En esta aleación, el carbono se presenta en forma combinada de carburo de hierro (Fe_3C), conocido metalúrgicamente como cementita.

Fundición gris. La fundición gris es el metal fundido más utilizado. En este tipo de hierro, el carbono está en forma de copos de grafito que forman multitud de muescas y discontinuidades en la matriz del hierro. La apariencia de la fractura de este hierro es gris porque las vetas de grafito están expuestas. La resistencia del hierro aumenta a medida que disminuye el tamaño de los cristales de grafito y aumenta la cantidad de cementita. La fundición gris es fácilmente mecanizable ya que el carbono-grafito actúa como lubricante para la herramienta de corte y también proporciona discontinuidades que rompen las virutas ya que están fundidas. El hierro gris tiene un amplio rango de resistencia que va desde los 20.000-30.000 psi (1.400-2.100 kg/cm^2) a los 90.000 psi (6.300 kg/cm^2) que pueden lograrse aleándolo con níquel, cromo, molibdeno, vanadio y cobre. Las tensiones admisibles según el código ASME, Sección IV, son las siguientes:

Clase	Tensión de rotura en kilopondios por pulgada cuadrada	CR kg/cm^2	Tensión admisible en kilopondios por pulgada cuadrada	σ kg/cm^2
20	20	129	4	26
25	25	161	5	32
30	30	193	6	38,7
35	35	226	7	45,2
40	40	258	8	52

Defectos físicos. Algunos de los defectos físicos más comunes que pueden presentarse en la fundición y que la debilitarán son las oclusiones, grietas, segregación de impurezas y estructura de grano grueso.

El azufre, que se combina con el manganeso o el hierro para formar sulfuros, vuelve frágil al hierro a alta temperatura. También incrementa las mermas. Por ello,

su proporción se limita normalmente a menos del 0,1 por 100 en las especificaciones de la fundición. El fósforo, en proporción de más del 2 por 100, hace al hierro frágil y lo debilita y empobrece. Sin embargo, también tiene el efecto de aumentar la fluidez y disminuir las mermas. Por ello es deseable al hacer fundiciones con formas complejas para piezas ornamentales donde la resistencia no es importante.

FABRICACIÓN DEL ACERO

La producción de acero a partir de la fundición implica la eliminación de tantas impurezas como sea posible, del ajuste del contenido de carbono al valor deseado y la adición de tanta aleación como sea necesaria para alterar y mejorar sus propiedades.

La fabricación del acero empieza con fundición bruta o arrabio. La fundición bruta se transforma en acero por medio de la oxidación de las impurezas con aire, oxígeno u óxido de hierro, ya que las impurezas combinan más fácilmente con el oxígeno que el hierro. El hierro bruto puede refinarse por oxidación solamente en el proceso ácido o por oxidación en conjunción con una escoria fuertemente básica en el proceso básico. El carbono, silicio y manganeso se eliminan por ambos procesos, pero el fósforo y algo del azufre de la fundición pueden eliminarse solamente en el proceso básico. El fósforo permanece persistentemente con el hierro si la escoria es fuertemente ácida o cuando es alta en sílice y además no se elimina. Los principales métodos en fabricación de acero para la subsiguiente laminación o forja son el proceso básico de oxígeno, el proceso básico de núcleo abierto y el proceso básico de horno eléctrico. El acero fundido puede elaborarse por los métodos anteriores y también por el método ácido eléctrico y el método ácido de núcleo abierto. La carga del horno es chatarra de acero y fundición de hierro en ambos procesos, el básico del oxígeno y el básico de núcleo abierto, y chatarra de acero seleccionada en el proceso de horno eléctrico. Pueden utilizarse pellets de acero prerreducido en estos procesos como parte de la carga.

Proceso de horno eléctrico. Los aceros de alta aleación se fabrican usualmente en el horno eléctrico (véase la Figura 6.4), porque el proceso del horno eléctrico ofrece las siguientes ventajas sobre los otros procesos:

1. Pueden obtenerse las temperaturas deseadas a causa del buen control de temperatura dentro de límites precisos.
2. Pueden mantenerse en el horno condiciones oxidantes, reductoras o neutras. Esto permite la adición de elementos de aleación a la fusión con mejor calidad.
3. La colada o fusión está libre de la contaminación del combustible quemado.
4. El azufre y las impurezas sólidas no metálicas son eliminadas significativamente, así como las impurezas sólidas no metálicas.

El control de calidad y composición en el horno eléctrico es mejor que en el proceso de núcleo abierto, pero el coste es algo más elevado. Algunos aceros se

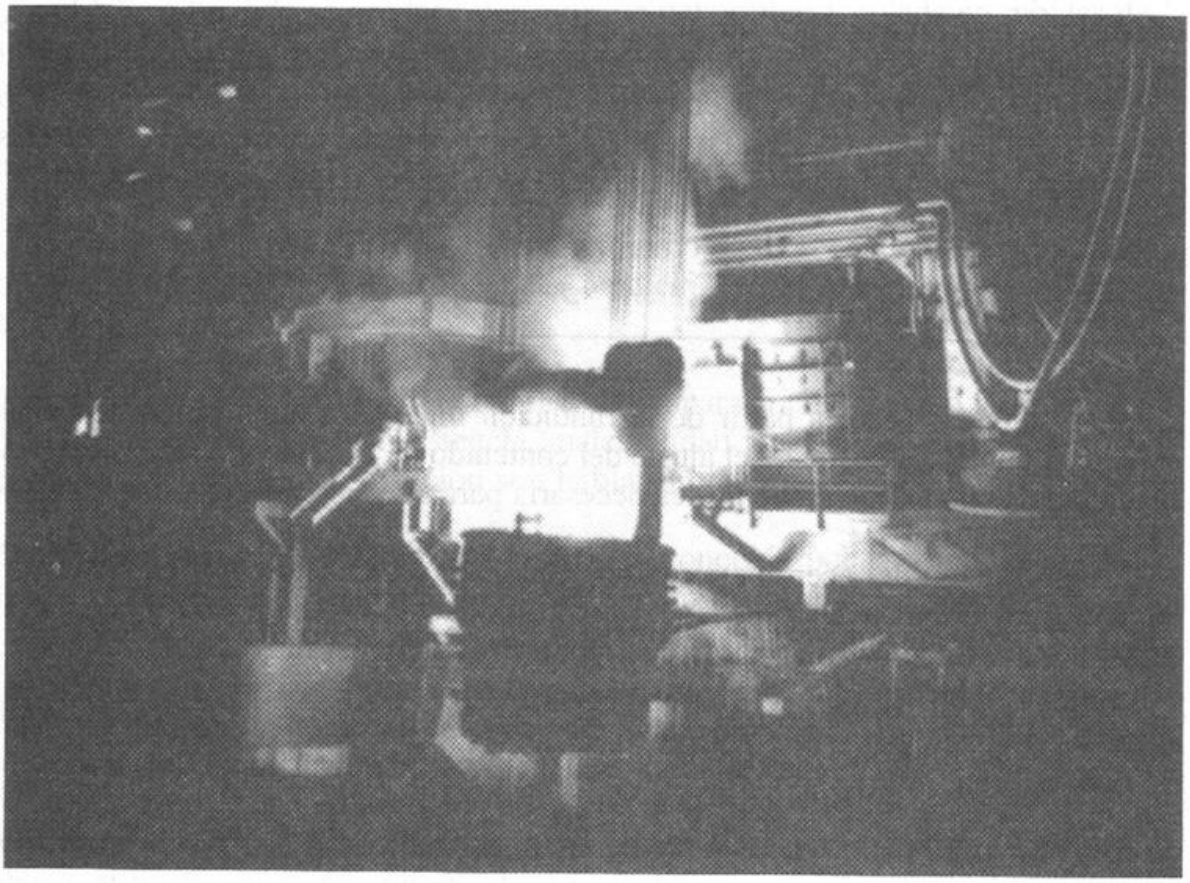


Figura 6.4. Horno de arco eléctrico descargando una colada fundida de 150 toneladas. (Cortesía de Lukens Steel Co.)

funden al vacío. Este procedimiento reduce los gases disueltos tales como oxígeno, nitrógeno e hidrógeno a un mínimo y reduce significativamente el número de inclusiones no metálicas.

Conformado del acero. Como el acero proviene del horno básico de oxígeno, horno de núcleo abierto, u horno eléctrico, puede moldearse directamente y tomar la forma deseada o bien disponerse en lingotes que pesan de 3 a 10 Tns. Después de la solidificación, a los lingotes se les da un conformado preliminar para laminarlos en forma de palanquilla, que pueden después reducirse a dimensiones finales por laminado, forja, estirado, u otras operaciones. Cada una de las operaciones afectará a la estructura cristalina, cambiando de este modo las propiedades del producto final. La Figura 6.5 muestra los diagramas típicos de tensiones para especímenes de acero de bajo carbono conformado por alguno de los más comunes métodos de fabricación.

La temperatura a la cual el acero se conforma mecánicamente tiene un profundo efecto sobre sus propiedades. El trabajo o conformado en frío aumenta la dureza, resistencia a la tensión y punto de rotura, pero sus índices de elongación-ductilidad y de reducción de sección disminuyen.

Los *tubos sin soldadura* para calderas están fabricados por penetración en caliente de las piezas en lingotes sólidos en máquinas especiales de agujerado diseñadas para ese propósito. Se realiza algún estirado en frío cuando los tubos requieren

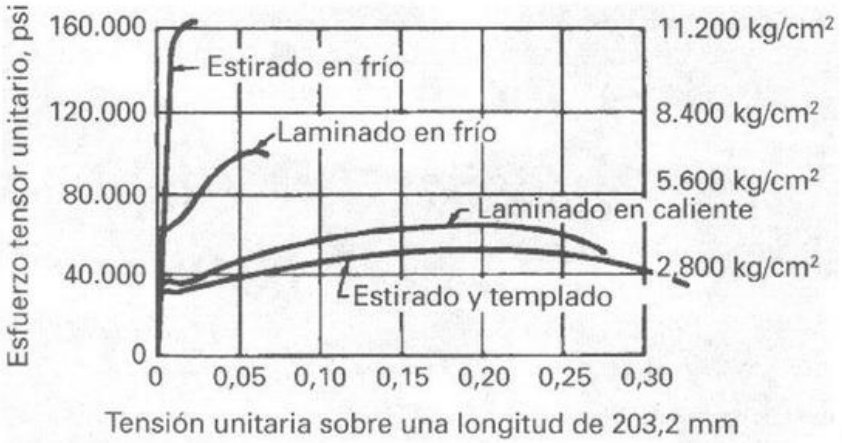


Figura 6.5. El método de las operaciones de conformado puede afectar a su resistencia final.

un acabado más fino o una tolerancia cerrada. Algunos tubos sin soldadura se hacen ahora por métodos de prensado y extrusión en caliente.

Los tubos soldados por *resistencia eléctrica* se elaboran conformando bandas planas en forma tubular denominada tubo estirado y después soldando los bordes con una máquina de soldadura por resistencia eléctrica. Comparados con los tubos sin soldadura, los tubos de caldera soldados por resistencia eléctrica tienen una superficie más fina, un espesor de pared más uniforme y menos excentricidad en el diámetro exterior de los tubos.

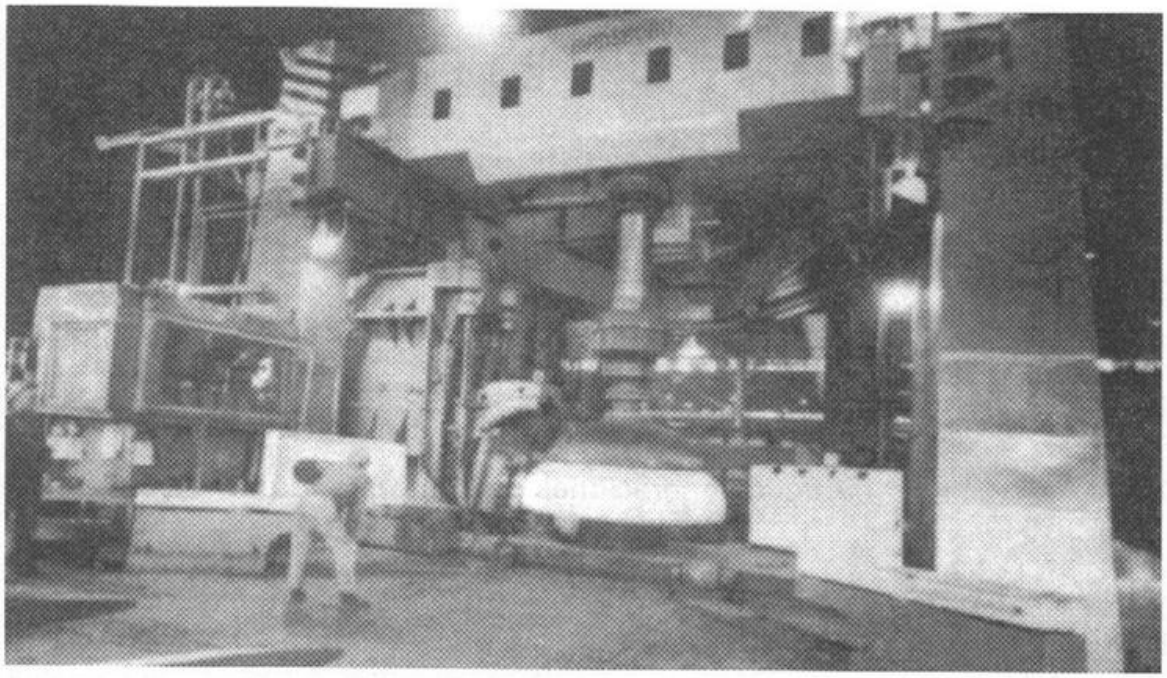
La Figura 6.6*a* de la página siguiente muestra una chapa de acero en caliente que está siendo conformada en fondo o casquete hemisférico en una máquina de conformado o forjado en caliente en una compañía de acero. Los fondos cóncavos se usan como piezas de cierre para los calderines de caldera, y son utilizados para recipientes a presión, reactores nucleares y todo tipo de vasijas o recipientes de procesos químicos y petrolíferos.

La Figura 6.6*b* muestra una laminadora haciendo una chapa plana.

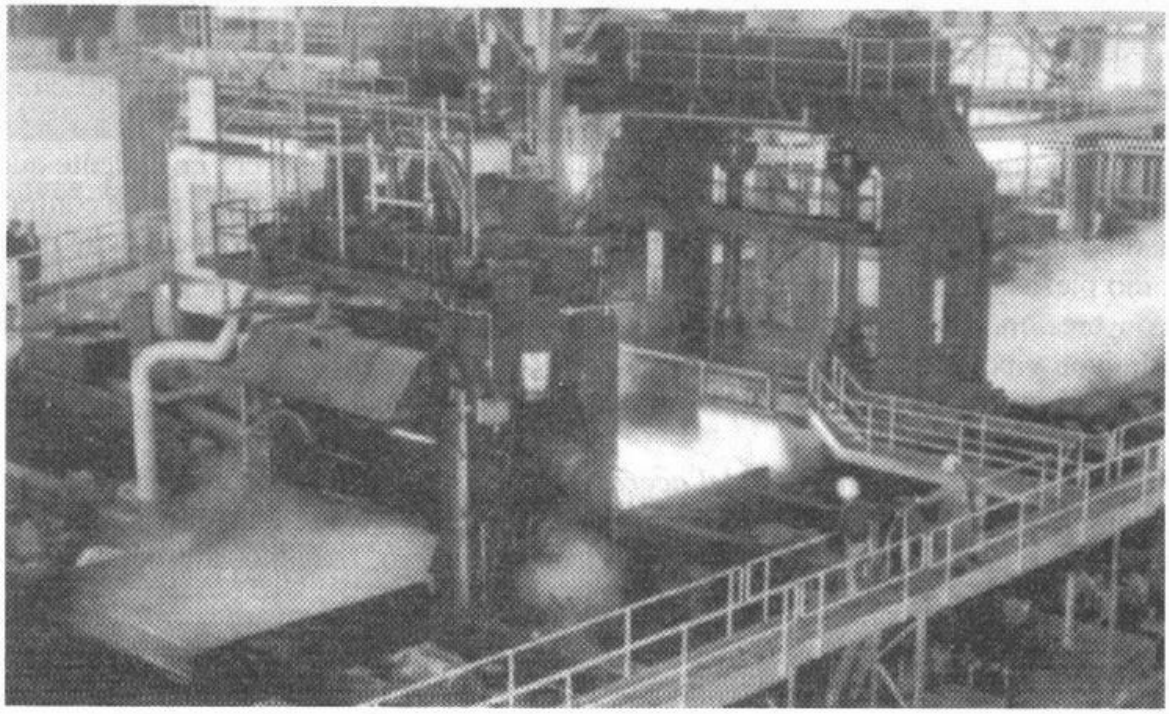
Impurezas de la manufactura del acero. La resistencia, ductilidad y propiedades relacionadas de las aleaciones hierro-carbono pueden verse afectadas por la presencia de elementos perjudiciales como azufre, fósforo, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno.

Azufre. El azufre tiene el mismo efecto sobre el acero que sobre la fundición, haciendo al metal menguar en sus propiedades en caliente, o frágil a temperaturas elevadas. Como resultado, puede ser perjudicial para el acero que va a utilizarse a temperaturas elevadas o, más particularmente, puede causar dificultades durante la laminación en caliente u otras operaciones de conformado. En los aceros con límites más estrictos, su proporción debe ser menor del 0,05 por 100.

Fósforo. El fósforo hace al acero bajar sus propiedades en frío o frágil a bajas temperaturas, de modo que es indeseable en piezas sometidas a cargas de impacto en frío. Sin embargo, tiene el efecto beneficioso de aumentar tanto la fluidez, que tiende a hacer más fácil la laminación en caliente, como la manejabilidad de las fundi-



(*a*)



(*b*)

Figura 6.6. Conformado en caliente del acero. (*a*) Forjado o conformado en caliente para producir un fondo cóncavo. (*b*) Proceso de laminación en caliente de lingotes para conformarlos en chapas planas. (*Cortesía de Luckens Steel Co.*)

ciones. Como el acero fundido es frágil en todo caso se añade fósforo para hacer el corte de fundición más limpio. La mayoría de las especificaciones para acero de estructura limita el contenido de fósforo a menos del 0,05 por 100.

Oxígeno. Cuando el acero está en estado líquido, cualquier oxígeno libre se combina fácilmente con el hierro para formar óxido de hierro. En el hierro o acero acabado, el óxido de hierro normalmente aparece en forma de inclusiones o motas distribuidas por todo el metal. Estas inclusiones inducen puntos de debilidad e incrementan la fragilidad, concentración de vacío y tensiones, que son indeseables porque promueven la formación de grietas que pueden dar como resultado una factura progresiva.

Hidrógeno. El hidrógeno, como el producido cuando el acero se sumerge en ácido sulfúrico para eliminar la capa de incrustaciones de laminación antes del estirado en frío, hace al acero frágil. El hidrógeno puede eliminarse por calentamiento del acero durante unas pocas horas, o aflora gradualmente del acero a temperaturas ordinarias (ambiente). Cuando está presente, el hidrógeno aumenta la dureza del acero.

Nitrógeno. El nitrógeno tiene un efecto endurecedor y de fragilidad sobre el acero. Esto puede ser perjudicial o deseable para producir una superficie dura, sobre el acero, bajo condiciones controladas de fabricación. Por ejemplo, en el proceso de integración, el acero al gas amoníaco a alrededor de 1.112 °F (600 °C) para producir una superficie dura, resistente al desgaste, sin disminuir la ductilidad del acero del centro de la pieza.

Inclusiones no metálicas. Las inclusiones no metálicas se forman durante la operación de laminado de chapa al conformar el acero. Muy a menudo, estas inclusiones producen escamado o planos en la chapa donde hay separación o vacíos de metal.

La calidad de la chapa de acero puede verse afectada significativamente por las inclusiones no metálicas. La presencia de inclusiones, como sulfuros y óxidos, afecta principalmente al comportamiento dúctil del acero. La calidad de un tipo particular de acero puede mejorarse por disminución de las inclusiones. Las pruebas no destructivas se usan mucho para aplicaciones a presiones críticas, como en reactores nucleares, en orden a hallar inclusiones.

Elementos de aleación en el acero. El propósito de añadir elementos de aleación al acero al carbono es impartir con producto acabado propiedades químicas que no están disponibles en piezas de acero al carbono fabricadas por procedimientos normales. Estas propiedades pueden implicar características deseables eléctricas, magnéticas o térmicas, así como consideraciones de ingeniería tales como: 1) alta resistencia a la tracción o dureza sin fragilidad; 2) resistencia a la corrosión; 3) elevada resistencia o límite de rotura a temperaturas elevadas o bajo cero; 4) otras características físicas deseables requeridas para resistir cargas especiales.

Carbono. Hasta un 1,2 por 100 de carbono en el acero aumenta la resistencia y ductilidad del mismo. Cuando el contenido de carbono está por encima del 2 por 100

se promueve la formación de grafito, que disminuye la resistencia y la ductilidad del acero. El contenido de carbono por encima del 5 por 100 ó 6 por 100 causa la fragilidad del metal con muy baja resistencia para cualquier aplicación de resistencia de cargas.

Manganeso. Por una combinación con el azufre, este elemento evita o previene la formación de sulfuro de hierro en las proximidades o entorno del grano. Esto minimiza las roturas superficiales a la temperatura del laminación del acero (defecto rojo), lo que da como resultado una mejora significativa en la calidad de la superficie después del laminado.

Níquel. Este elemento mejora la tenacidad o resistencia al impacto. A este respecto es la más efectiva de todos los elementos de aleación comunes para aumentar la tenacidad a bajas temperaturas.

Cromo. Este elemento contribuye a la resistencia a la corrosión y resistencia en caliente de aceros aleados. Como fuerte formador de carburos, el cromo se usa frecuentemente en aceros de tipo carburizado y de aceros de alta resistencia y elevado porcentaje de carbono para resistencias elevadas al desgaste. Una aleación de 18 por 100 de cromo y 8 por 100 de níquel (cromo-níquel 18/8) se utiliza mucho como acero inoxidable en equipos de presión que requieran resistencia y tenacidad a la corrosión.

Molibdeno. Como el níquel, el molibdeno no se oxida en el proceso de fabricación del acero, característica que facilita un control preciso del temple. Mejora mucho la resistencia a temperatura elevada y reduce la susceptibilidad del acero a la fragilidad del temple.

Boro. Como el boro no forma carburos ni refuerza la ferrita, puede alcanzarse un nivel de tenacidad sin un efecto adverso de la facilidad de mecanizado y conformado en frío que puede tener lugar con otros elementos comunes de aleación.

Aluminio. En cantidades entre el 0,95 por 100 y el 1,30 por 100, el aluminio se usa en aceros nitrurados a causa de su fuerte tendencia formar nitruros de aluminio, que contribuyen a una elevada dureza superficial y superior resistencia al desgaste.

Silicio. El silicio se combina con el carbono para formar carburos duros que, cuando están distribuidos adecuadamente en la aleación, tienen el efecto de aumentar la resistencia elástica sin pérdida de ductilidad.

Tungsteno. El tungsteno forma carburos duros estables cuando se añade al acero. Eleva la temperatura crítica, aumentando así la resistencia de la aleación a temperaturas elevadas.

Vanadio. Este elemento actúa como agente desoxidante como el aluminio lo hace sobre el acero fundido. Forma carburos muy duros, incrementando así la resistencia elástica de las aleaciones de acero de bajo y medio carburo.

Pueden añadirse otros elementos para aumentar la resistencia y tenacidad de laminación de los aceros en la categoría de alta resistencia y baja aleación

Tratamiento térmico de los aceros. Cuando un acero se calienta a cierta temperatura y después se enfría rápida o lentamente, sus propiedades físicas como el límite elástico, tensión de rotura y dureza pueden verse modificadas.

Los tratamientos térmicos caen dentro de dos categorías generales: aquellos que aumentan la resistencia, dureza y tenacidad por enfriamiento y temple y los que disminuyen la dureza y promueven la uniformidad por enfriamiento lento por encima del rango de transformación o por calentamiento prolongado dentro o por debajo del rango de transformación, seguido de enfriamiento lento.

El *recocido* consta de un calentamiento del acero a cierta temperatura y enfriamiento mediante un proceso relativamente lento. El recocido puede utilizarse para rebajar tensiones como las producidas por la forja o fundición, para afinar la estructura cristalina del acero o para alterar la ductilidad o su tenacidad.

El *recocido de eliminación de tensiones* implica calentar hasta una temperatura que se aproxime al rango de transformación, manteniendo suficiente tiempo para alcanzar una temperatura uniforme a través de la pieza y después enfriar a temperatura ambiente atmosférica. El propósito de este tratamiento es descargar las tensiones residuales inducidas por la normalización, mecanizado, conformado por deformación en frío de cualquier tipo. Puede experimentarse algún ablandamiento y mejora de ductilidad dependiendo de la temperatura y tiempo implicado. La normalización implica calentar a una temperatura uniforme de cerca de 100 °F a 150 °F (37,8 °C a 65,6 °C) por encima del rango de transformación, seguido de un enfriamiento al aire.

El *endurecimiento* consiste en calentar el acero por encima del rango de transformación y enfriarlo repentinamente por inmersión en agua, aceite o algún otro medio de enfriamiento que absorba calor rápidamente.

El *temple* se define como un proceso de enfriamiento rápido desde una temperatura elevada por contacto con líquidos, gases o sólidos. El temple aumenta la dureza del acero si su contenido de carbono es 0,20 por 100 o más. También eleva el límite elástico y la carga de rotura y reduce la ductilidad; sin embargo, induce tensiones internas y el metal puede volverse frágil. Esto puede minimizarse por el recocido o recalentamiento del metal o material hasta una temperatura apropiada metalúrgicamente determinada para el metal o material implicado en la operación de temple.

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Las propiedades de los materiales para estructuras de ingeniería se describen generalmente bajo los siguientes encabezamientos:

1. *Físicas.* Éstas describirán la composición del material, estructura, homogeneidad, peso específico, conductividad térmica, capacidad para dilatarse y contraerse y resistencia a la corrosión.
2. *Conformabilidad.* Ésta se relaciona con la elaboración del material como la fusibilidad (soldadura), forjabilidad, maleabilidad para conformar el material por flexión y/o mecanizado.

3. *Mecánicas.* Las propiedades mecánicas describen la capacidad de un material para resistir cargas y se obtienen normalmente a partir de pruebas.

Las propiedades básicas mecánicas son los límites plásticos, módulos de elasticidad, cargas de ruptura, límites de resistencias y dureza. Características mecánicas secundarias determinadas de las básicas o simultáneamente con ellas son la resistencia, tenacidad, ductilidad y fragilidad.

La *resistencia* depende del tipo y naturaleza de la carga. La resistencia elástica de un metal se expresa por una correspondiente tensión del límite elástico. La resistencia al impacto se mide por el módulo de resistencia correspondiente. La resistencia de tenacidad se expresa por el límite correspondiente de tenacidad. Véase posteriormente los capítulos sobre tensiones, presiones y esfuerzos.

Otras cualidades además de la resistencia son también importantes.

La *dureza* es una característica relativa. Hay varios métodos para medirla, todos de naturaleza arbitraria. El número de dureza Brinell (Bhn) se obtiene como sigue: una bola de acero endurecido de 10 milímetros de diámetro se presiona bajo una cierta carga, F kilogramos, sobre la superficie pulida del material a probar; el diámetro D de la marca o huella dejada se mide en milímetros y la profundidad h se calcula a partir de ella. El número de dureza, Bhn, se expresa entonces como sigue:.

$$\text{Bhn} = \frac{F}{10\ \pi\ h}$$

También se puede utilizar el escleroscopio o durómetro Shore, que es un pequeño cilindro de acero con una punta endurecida a la que se permite caer sobre la superficie del material a probar, y la altura de rebote del cilindro se toma como medida de la dureza.

El número de dureza obtenido con el instrumento Rockwell se basa en la profundidad adicional a la que una punta o puntero se impulsa por una carga pesada más allá de la profundidad a la que el mismo puntero penetrado ha sido impulsado por una carga más ligera y definida.

Un material es *dúctil* si es capaz de soportar una deformación grande, permanentemente y todavía ofrecer una gran resistencia a la rotura. La medida de la ductilidad es el porcentaje de elongación (o alargamiento) o el porcentaje de reducción de área cuando se realiza una prueba o se lleva a rotura, y se usa como medida relativa. La ductilidad ayuda a eliminar la concentración localizada de tensiones a través de la elasticidad local. Es una característica necesaria de un material utilizado para soportar cargas vivas, especialmente donde pueden concurrir tensiones concentradas.

La *fragilidad* es una característica opuesta a la ductilidad y tenacidad. Un material puede considerarse frágil si su elongación a rotura por medio de tracción es menor que el 5 por 100 en un espécimen de 2″ (50,8 mm) de longitud.

Tenacidad es un término usado para denotar la capacidad de un material para resistir el fallo bajo carga dinámica. El módulo de tenacidad se define como una cantidad de energía por unidad de volumen que un material puede soportar o absorber sin que ocurra fractura. El módulo de tenacidad es útil como índice para comparar la resistencia de los materiales a las cargas dinámicas, y es especialmente aplicable en el diseño de piezas móviles de maquinaria.

CÓDIGO ASME. DESIGNACIONES DEL NÚMERO SA

Los números SA, tales como el SA-178, de los tubos de caldera de acero al carbono soldados por resistencia eléctrica, se usan en las distintas secciones del código ASME de calderas para mostrar la especificación admisible del material para diferentes componentes de una caldera o recipiente a presión. La lista de materiales admisibles es bastante amplia y crece actualmente a medida que las laminaciones del acero y las metalúrgicas desarrollan nuevos materiales que encuentran aprobación por los comités de admisión y aprobación. La Sección II ofrece un listado de los requerimientos específicos para materiales aprobados en la Sección I. Esto incluye ahora tensiones admisibles para los materiales SA listados según la temperatura de trabajo. Dicha tabla de tensiones se muestra en las Figuras 9.2 y 9.3 del Capítulo 9, donde se revisan los cálculos de tensiones del código.

Se suministran a continuación unas pocas definiciones que son apropiadas al revisar los requisitos del código ASME de calderas.

Recubrimiento es todo material aplicado sobre un tubo de acero para aumentar su resistencia a la corrosión, pero que no contribuye a la resistencia del tubo para soportar la presión interna según las normas del Código.

Calidad de hogar (o caja de llamas) es un acero que es adecuado para su utilización en recipientes a presión que estarán expuestos a llamas o calor y por ello capaz de resistir las tensiones térmicas y mecánicas resultantes.

Calidad de calderas (o bridas) es un acero para utilización en recipientes a presión que no están expuestos al fuego o calor radiante. Se requiere una fabricación especial, pruebas y marcaje del acero como calidad de calderas.

Carga o colada de acero es el acero producido de una misma carga o colada de horno y consiguientemente prácticamente idéntico en sus propiedades.

Aceros resistentes al calor son aquellos aceros calificados o apropiados para el servicio a relativamente altas temperaturas porque conservan la mayor parte de su resistencia y aguantan o soportan la oxidación a estas temperaturas.

Acero calmado es un acero al que se le han añadido suficientes agentes desoxidantes en su fabricación para evitar la evolución de gases durante la solidificación y así reducir la posibilidad de porosidad en el acero.

Acero mermado en caliente es el metal que es o se vuelve frágil a elevada temperaturas.

Aceros maraging son un grupo de aceros martensíticos de alto contenido en níquel, que tienen elevada resistencia y ductilidad.

Martensita es una estructura distintiva que desarrollan muchos aceros al enfriarse lo más rápidamente posible desde la temperatura de temple. En esta forma, el acero alcanza su máxima dureza.

Test de McQuaid-Ehn es una prueba utilizada para revelar el tamaño del grano de un acero calentándolo por encima de su rango crítico en un medio carbonoso. Esto obliga al grano a mostrarse claramente cuando se ha pulido, tratado con agua-fuerte y visionado al microscopio. Los tamaños del grano van desde el número 8 (fino) al número 1 (grueso).

Microestructura es la estructura de los metales revelada al menos como por un examen de muestras pulidas y tratadas al agua-fuerte.

Fragilidad de neutrones es el resultado del bombardeo de un acero con neutrones tal y como ocurre en un reactor nuclear. En aceros, la fragilidad de neutrones produce una elevación de la temperatura de transición de dúctil a frágil.

Perlita es un constituyente del acero relativamente duro formado por capas alternativas de ferrita (hierro) y cementita (carburo de hierro). Cuando la proporción del carbono es del 0,8 por 100, se denomina acero eutectoide.

Endurecimiento por precipitación es el proceso de una aleación por calentamiento con el propósito de permitir a los constituyentes precipitar fuera de una solución sólida.

Acero estriado es un acero que cuando se hace la colada tiene suficiente oxígeno para evolucionar con apreciables cantidades de gases durante la solidificación. La evolución gaseosa da por resultado un acabado del acero con una superficie muy neta, pero con impurezas concentradas en el interior, de ahí el nombre.

Acero semicalmado es un acero que posee propiedades intermedias entre las del acero calmado y el estriado, y que se caracteriza por grados variables de uniformidad y composición cuando se manufactura.

Acero estirado es un acero o chapa de acero a partir de la cual se elaboran los tubos.

Solución sólida es la condición en la que un elemento se disuelve en otro elemento mientras el elemento que se disuelve está en forma sólida y no en estado líquido.

Requisitos del material según el código ASME. Deben seguirse por el fabricante o reparador ciertos procedimientos para estar seguros de que solamente se usan materiales especificados según la normativa de construcción de calderas. También es parte de la responsabilidad del inspector autorizado ayudar a implementar un procedimiento de control de calidad para asegurarse de que se utiliza material según el Código. Estos controles pueden (deben) incluir lo siguiente:

1. El material a utilizar para una caldera o recipiente a presión debe especificarse en la sección del Código bajo el cual se construye la caldera o recipiente a presión. Por ejemplo, si una caldera de alta presión está implicada debe listarse como material permisible en la Sección I (Calderas de potencia) o los datos deben presentarse para demostrar que tienen las mismas características fisicoquímicas que el material listado en el Código.
2. El fabricante de la caldera o recipiente a presión generalmente pide materiales según el Código a las acererías. El laminador de las chapas es responsable de efectuar las pruebas necesarias según las especificaciones dadas según la Sección II del código ASME de calderas y recipientes a presión*.
3. Los requisitos de la Sección II que el fabricante acerista debe haber realizado comprenden lo siguiente:
   - *a*) Análisis químico del acero para determinar si está dentro de los límites de las especificaciones del Código.
   - *b*) Pruebas para determinar si la estructura metalúrgica del grano está dentro de los límites de la especificación del Código.

---

* En España, «Reglamento de Aparatos a Presión e Instrucciones Técnicas Complementarias» del MINER.

c) Inspección de las chapas o tubos para notar si existen defectos como sopladuras, escoria, escamaciones, laminaciones o cualquier imperfección que pueda estar presente, y, si lo está, si cae dentro de los límites o tolerancias especificadas en el Código.
d) Pruebas de tensión y doblado (flexión) especificadas en el Código para controlar si caen dentro de los límites de sus especificaciones.
e) Pruebas de impacto para comprobar la fatiga o tensión de rotura.
f) Informe de laminación demostrando que el material cumple las especificaciones; esto debe certificarse por la persona responsable del laboratorio de pruebas del fabricante del acero.

La chapa de acero para toda parte o pieza de caldera sometida a presión y expuesta al fuego o a productos de combustión debe ser de la calidad del hogar o caja de fuegos. Si no está expuesta al fuego o a productos de la combustión, la chapa puede ser de calidad caldera simplemente. Algunos aceros de calidad de hogar o caja de fuego son de acero al carbono-silicio, especificación SA-201, o acero al cromo-manganeso-silicio, de especificación SA-202 y/o acero al molibdeno, especificación SA-204. Compruebe el Código para otros aceros de calidad de hogar (caja de fuego) y refiérase a la especificación de material de ASME, Sección II, para sus propiedades y características físicas y químicas. Los calderines de acero sin costura forjados hechos de acuerdo con las especificaciones SA-266 y SA-336 para aceros aleados son utilizados para toda pieza de caldera a la cual se le permite calidad de hogar o calidad de caldera.

Los tubos o tubuladuras pueden estar hechos de acero al horno eléctrico, núcleo abierto, horno básico al oxígeno o ácido desoxidado según el proceso Bessemer de acuerdo a especificaciones normalizadas. Algunos materiales para tubos listados en la Sección I incluyen los aceros al carbono soldados por resistencia eléctrica tipo SA-178; acero al carbono para tubos sin soldadura para servicio de alta presión SA-192; y SA-210 que es un acero al carbono sin soldadura para tubos de caldera y tubos de sobrecalentadores. Otros aceros para tubos incluyen los de baja aleación tales como las series SA-213 TP, un material para tubos al cromo-níquel. Los materiales para riostras y tirantes de arriostramiento permitidos son los de riostras tubulares taladradas y roscadas SA-36 y SA-675. Las riostras, tirantes y virotillos redondos con extremo para conexión soldada deben ser SA-36 o SA-675. Los tubos de acero sin soldadura utilizados como arriostramiento deben ser del tipo SA-192 o SA-220.

Es importante comprobar la sección del Código con la que se construye una caldera por recipiente a presión o componente nuclear y se estampa o graba como objeto del Código para anotar si el material de una pieza está permitido con esa sección por el código ASME o normativa equivalente. Si la presión no excede de 250 psi (17,5 kg/cm^2) y la temperatura no sobrepasa los 450 °F (232 °C) puede usarse la fundición gris SA-278 para piezas de caldera como conexiones de tubo, columnas de agua y válvulas o sus bonetes. El hierro fundido no puede utilizarse para toberas o bridas para ninguna presión ni temperatura, pero esto no se aplica a las calderas de baja presión. Las mismas piezas a presión enumeradas para fundición pueden fabricarse en fundición maleable (hierro malcable) tipo SA-395, excepto si la presión está limitada a un máximo de 350 psi (24,5 kg/cm^2) y la temperatura a 450 °F (232 °C).

El espesor mínimo de chapa es de 1/4″ (6,35 mm) para cualquier chapa sometida a presión. Una excepción la constituyen las calderas miniatura de construcción sin soldadura donde el espesor mínimo de chapa puede ser de 3/16″ (4,76 mm). El espesor mínimo de pared tubular es de 3/8″ (9,5 mm), excepto en calderas miniatura donde es de 5/16″ (7,94 mm). El material de la chapa original debe ser no más de 0,01″ (0,254 mm) más delgado que el requerido por la fórmula utilizada para calcular su resistencia, supuesto que la tolerancia de fabricación (o de cuando se mide la chapa) también tiene esta tolerancia de no menos de 0,01″ (0,254 mm).

Tablas de tensiones normalizadas según el Código. Después de que el material ha sido identificado como permitido por la sección del Código bajo la que se construye o se repara la pieza o componente, las tensiones admisibles para las diferentes temperaturas pueden obtenerse de las tablas de tensiones de la Sección II, parte D, del código ASME. Esta tabla se muestra en el Capítulo 9 para resolver problemas de presiones admisibles utilizando las ecuaciones normales del Código y tensiones admisibles para la pieza o componente en consideración y para la temperatura media de trabajo esperada.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

1. Cite algunas propiedades mecánicas típicas que describan la capacidad de un material de acero para resistir cargas.

   RESPUESTA: Las propiedades mecánicas que son importantes para describir un acero son su resistencia (de rotura), límite elástico, límite de tenacidad, dureza y módulo de elasticidad.

2. ¿Cuáles son los tres nombres más importantes dados al método utilizado para medir la dureza de un material de acero?

   RESPUESTA: Brinell, Rockwell y Shore (escleroscopio o durómetro) son los métodos más importantes para describir la dureza de un acero.

3. ¿Cómo se define una matriz espacial?

   RESPUESTA: Una matriz espacial es la disposición geométrica de los átomos en la formación de un cristal de un metal dado, tal como la matriz cúbica centrada en las caras o matriz cúbica centrada en el cubo, que describen la disposición de los átomos en un cristal de hierro.

4. ¿Cuál es la matriz espacial de un hierro alfa?

   RESPUESTA: El hierro alfa se compone de matrices cúbicas centradas en el cubo.

5. ¿Qué significa eutéctico?

   RESPUESTA: Un eutéctico es la aleación de una solución que tiene el punto de fusión más bajo de la solución.

6. ¿Qué es la temperatura de transformación en los aceros al carbono?

RESPUESTA: Es la temperatura dentro de la cual la austenita (acero no magnético) se forma por calentamiento y también el intervalo de temperatura dentro del cual la austenita desaparece al enfriarse en una solución hierro-carbono. La temperatura de transformación depende del contenido de carbono, como se ve en el diagrama de equilibrio para la solución de equilibrio hierro-carbono.

7. Cite algunos defectos físicos típicos que pueden encontrarse en el hierro fundido.

RESPUESTA: Sopladuras, grietas, segregación de impurezas, grano grueso y falta de estructura uniforme del grano son los defectos más comunes.

8. ¿Cuáles son los dos pasos principales en la fabricación del acero a partir del mineral de hierro?

RESPUESTA:

1. Eliminar el oxígeno del mineral produciendo el hierro bruto o arrabio.
2. Eliminar el exceso de carbono del hierro bruto o fundición para producir acero.

9. ¿En qué difiere el acero de la fundición?

RESPUESTA: El contenido de carbono es mucho menor; la resistencia mecánica mucho mayor y la ductilidad y resistencia de la carga de choque son mayores.

10. Brevemente, ¿cómo se quita el exceso de carbono del hierro para formar acero?

RESPUESTA: Soplando aire u oxígeno a través del hierro fundido. El oxígeno del aire se une al carbono por la combustión.

11. ¿Cómo se produce el acero de alta calidad?

RESPUESTA: Por el método del horno eléctrico, debido algo al control más preciso y al mínimo de factores oxidantes.

12. ¿Por qué no siempre se usa el método del horno eléctrico?

RESPUESTA: El costo de fabricación por este método es mayor.

13. ¿Cuáles son los requisitos del código ASME para propiedades químicas de los aceros de caja de fuegos (hogar) y de calidad calderas?

RESPUESTA: Para un acero de caja de fuegos, el mismo contenido de carbono; para chapas de no más de 3/4″ (19 mm) de espesor será del 0,25 por 100, y para chapas de más de 3/4″ (19 mm) de espesor, 0,3 por 100; el máximo contenido de fósforo (P) para el acero obtenido por el método ácido es del 0,04 por 100, y para el acero hecho por el método básico, 0,035 por 100; el máximo contenido de azufre es del 0,05 por 100.

14. ¿Cuál es el mínimo límite elástico requerido para el acero que sea calidad caldera o caja de fuego?

RESPUESTA: La mitad de la resistencia mecánica.

15. ¿Cuánto, por debajo del espesor especificado, puede laminarse una chapa de caldera y todavía ser admisible?

RESPUESTA: 0,010″ (0,254 mm)

16. ¿Dónde y cómo será marcada una chapa de caldera?

RESPUESTA: En al menos dos sitios, a no menos de 1 pie (0,3 m) desde los bordes debería estar el nombre o etiqueta del fabricante, el número de ensayo, el tipo de acero y la resistencia mínima del rango de 10.000 lbs (4.550 kg/cm^2).

17. ¿Qué determina la dureza de un acero?

RESPUESTA: El contenido de carbono, el contenido de aleación y la estructura del grano, a menudo debida al tratamiento térmico.

18. ¿Cómo puede cambiarse la estructura del grano y la dureza?

RESPUESTA: Mediante tratamiento térmico a temperaturas por encima del punto crítico inferior y por trabajo mecánico.

19. ¿Cuáles son las principales diferencias entre fundición y hierro maleable?

RESPUESTA: El hierro maleable es más dúctil, soportará con seguridad una carga de choque (impacto) considerablemente mayor que la fundición. Posee mayor resistencia.

20. ¿Qué son ductilidad y maleabilidad?

RESPUESTA: Estos términos son prácticamente sinónimos. Describen la capacidad de un material para soportar un grado comparativo de deformación sin fallo o desajustado de su resistencia a otras propiedades físicas.

21. ¿Cuál es la medida habitual de la ductilidad?

RESPUESTA: El porcentaje de elongación que se halla al hacer una prueba de resistencia.

22. ¿Qué es dureza?

RESPUESTA: Es la propiedad de un material para soportar la deformación superficial en aplicación de una fuerza externa.

23. ¿Qué es fragilidad?

RESPUESTA: Es una tendencia de un material a facturarse al aplicarle una carga de choque.

24. ¿Hay relación definida entre dureza y fragilidad?

RESPUESTA: Normalmente no. Por ejemplo, algunos de los metales llamados blancos son bastante frágiles pero blandos.

25. ¿Hay alguna relación definida entre dureza y tenacidad?

RESPUESTA: Normalmente no. La tenacidad es una propiedad que capacitará a un material para soportar una deformación así como una abrasión como la que se requiere para los dientes de una excavadora.

26. ¿Qué son fatiga y rotura por fatiga?

RESPUESTA: Fatiga es el «cansancio» del metal. Es la rotura a través del grano cristalino de la estructura fibrosa de un material después de un número de aplicaciones de tensión

o inversiones de tensión. La resistencia a la fatiga es la capacidad de un material para resistir un gran número de aplicaciones de tensión o inversiones sin fallo (rotura).

27. ¿En qué dirección debe trabajar la fibra en las chapas de caldera y qué diferencia supone esto?

RESPUESTA: La fibra trabaja en la dirección en la que ha sido laminada la chapa, normalmente paralela a su dimensión longitudinal mayor. En fabricación, la fibra trabaja circunferencialmente, porque la dimensión mayor de la chapa está solicitada normalmente en esta dirección y para mantener la mayor carga tensora sobre la chapa se la requiere normalmente en esta misma dirección, así por ello denominada estructura fibrosa.

28. ¿Cuánto pesa una chapa de caldera de 12″ × 12″ × 1″ (304,8 mm × 304,8 mm × 25,4 mm)?

RESPUESTA: El peso promedio de una chapa de acero de caldera es de : 0,28 lb/pulgada cuadrada (7,76 kg/cm^2), por tanto:

$$12 \times 12 \times 1 \times 0{,}28\ (3{,}048 \times 3.048 \times 0{,}254 \times 7{,}76) = 40{,}3 \text{ lbs } (18{,}3 \text{ kg}).$$

29. ¿Cómo se diferencia el hierro forjado del acero?

RESPUESTA: El hierro forjado es de estructura mucho más fibrosa que la del acero. Si un punto (mota) de la superficie del metal se pule con una lija o esmeril (y un paño) la estructura fibrosa normalmente puede verse. Puliendo el metal en una piedra esmeril (rotativa) mostrará un chispeo rojizo del hierro forjado y unas chispas amarillentas del acero.

30. ¿Qué es una chapa «laminada» de caldera?

RESPUESTA: Una que contiene un estrato de escoria laminado por accidente.

31. ¿Qué daño produce una «laminación» o «escamado»?

RESPUESTA: Es un aislante que evita la conducción libre del calor. Si la chapa está en zona de alta temperatura, puede dar lugar a una ampolla a causa del sobrecalentamiento de la chapa en el lado de fuego y de la «laminación».

32. ¿Qué es fragilidad de «muesca»?

RESPUESTA: Es la susceptibilidad de un material a la fractura frágil en puntos de concentración de tensiones, como en una esquina o punto afilado. Cuando se realizan ensayos sobre materiales con una muesca, el material se considera frágil por muescas si la resistencia del elemento con muesca es menor que la del elemento sin ella.

33. ¿Es la tensión real resistente la que se graba sobre una chapa de acero o hay un rango o franja según el código ASME?

RESPUESTA: Para un acero al carbono, la resistencia real puede estar entre 55.000 y 65.000 libras/pulgada cuadrada (4.550 a 3.850 kg/cm^2), pero la chapa se marca con 55.000 libras/pulgada cuadrada (3.850 kg/cm^2), siendo el rango permisible de 10.000 libras/pulgada cuadrada (700 kg/cm^2). Si la chapa cae ligeramente por debajo de 55.000 libras/pulgada cuadrada de resistencia, se marcaría 45.000 libras/pulgada cuadrada (3.150 kg/cm^2).

34. ¿Qué es una incrustación de laminación y qué daño puede producir?

RESPUESTA: Es una escamación de óxido de hierro formada en la superficie de una chapa cuando, después de laminada a alta temperatura, se expone al aire. Puede ser causa de deterioro de la chapa en una caldera en servicio o puede promover y situar una corrosión localizada.

35. ¿Dónde puede hallarse la resistencia exacta de una chapa?

RESPUESTA: En el informe de laminación.

36. ¿Qué más enseña el informe de laminación?

RESPUESTA: El espesor, propiedades químicas, otras propiedades físicas requeridas, principalmente elongación y límite elástico, nombre del fabricante y los números de colada y chapa.

37. ¿Cuál es el efecto del azufre y el fósforo cuando se funden en el acero?

RESPUESTA: El azufre hace frágil al acero a alta temperatura, en lo que a menudo se refiere como «mermado» en caliente. El fósforo hace frágil al acero a bajas temperaturas, así que es indeseable en piezas sometidas a cargas de impacto cuando se enfrían. Esta fragilidad en frío se denomina a veces «mermado» en frío.

38. Al hacer una inspección en el almacén de un vendedor de chapas para calderas construidas según el código ASME, ¿que será comprobado especialmente por un inspector oficial del Código?

RESPUESTA: La chapa deberá comprobarse en los siguientes términos:

1. Examinar los informes y notas del fabricante-laminador y anotar si la placa cumple las especificaciones del Código para el material.
2. Comprobar el sello de la chapa y notar si el estampillado identifica la chapa con el informe de laminación, incluyendo resistencia, espesor tipo y calidad de acabado.
3. Hacer un examen visual de la chapa para detectar posibles defectos tales como grietas, laminaciones, inclusiones, poros y condiciones similares cuestionables.

39. ¿Cuándo puede y debe utilizarse un acero de caja de fuego o calidad de caldera según el código ASME de calderas? ¿Qué proceso de fabricación está estipulado?

RESPUESTA: El acero calidad caja de fuego debe usarse cuando piezas o partes de caldera están expuestas al fuego o productos de combustión. Para otro servicio, el acero calidad caja de fuego o calidad de caldera puede utilizarse. El acero debería estar hecho en un proceso de horno de núcleo abierto o de horno eléctrico bien sea por el método ácido o el básico.

40. ¿Cuál es la presión máxima de trabajo permisible y la máxima temperatura admisible en una columna de agua hecha de fundición o fundición maleable?

RESPUESTA: Según el código ASME, para fundición: 250 psi (17,5 kg/cm^2) y 450 °F (232 °C); para fundición maleable: 350 psi (24,5 kg/cm^2) y 450 °F (232 °C).

41. ¿Quién es responsable del marcaje de la chapa de acero utilizaba en calderas de alta presión?

RESPUESTA: El fabricante laminador que ha hecho la chapa.

42. Cite algunos tipos de fundición.

RESPUESTA: Los tipos de fundición son: blanca, gris, hierro maleable y fundición dúctil. Las fundiciones se clasifican por sus resistencias: 20.000, 30.000, 40.000 libras/pulgada^2, etc. (1.400, 2.100, 2.800 kg/cm^2, etc.).

43. ¿Qué proceso se usa para la fabricación de tubos?

RESPUESTA: Los tubos se fabrican bien por el método sin costura (sin soldadura) o por el proceso de soldadura a tope.

44. Defina fragilidad y rotura frágil.

RESPUESTA: Fragilidad es la fractura repentina de un material sin una deformación plástica previa. La rotura frágil es la propagación rápida de una grieta con un pequeño gasto de energía a medida que la grieta progresa hasta la última separación del metal.

45. ¿Qué es la deformación plástica?

RESPUESTA: Cuando un material es sometido a tensión (por ejemplo tracción) más allá de su límite elástico, ocurre una deformación permanente o distorsión en el metal, sin embargo, la distorsión tiene lugar de un modo dúctil.

46. ¿Suministra la Sección II, parte D, del código ASME otra información además de las tensiones admisibles de los materiales?

RESPUESTA: La Sección II, parte D, lista además de cada material, sus resistencias o límites elásticos y de rotura y también lista en las Secciones I, III y VIII si se permite un determinado material en particular. También incluye cuadros de presiones externas para cálculo de presiones admisibles sobre piezas o componentes de caldera sometidos a presión externa, como los tubos en las calderas pirotubulares.

47. ¿Qué tipo de tuberías requiere un sello y certificación según el Código, incluso si está fabricado según las normas del código ASME B31.1 Tuberías de presión?

RESPUESTA: El preámbulo de la Sección I define esto como tuberías externas, consistentes en tuberías desde la caldera a cualquier válvula requerida por el Código. Esta tubería requiere informes según el Código para ser elaborada por un poseedor de sello SA o PP. La tubería implicada es de vapor a la válvula de corte, tubería de agua de alimentación, tubería de purga y venteo de vapor, drenaje de caldera y tuberías diversas exteriores como las de purga superficial, tubería de vapor y agua para columnas de agua y niveles de vidrio, y la línea de recirculación para una caldera de agua o alta temperatura.

48. ¿Qué presión de diseño se requiere según el Código para las tuberías de la pregunta 47?

RESPUESTA: Para tuberías de vapor, la presión de ajuste de la válvula de seguridad no puede ser inferior a 100 psi (7 kg/cm^2). Para tuberías de alimentación de agua de purga, la presión de diseño debe ser al menos 125 por 100 de la presión máxima de trabajo admisible en la caldera o 225 psi (15,75 kg/cm^2) por encima de la presión máxima de trabajo admisible, la que sea menor pero sin que pueda ser menor de 100 psi (7 kg/cm^2).

La mayoría de las tuberías deben diseñarse para una presión al menos igual a la máxima presión de trabajo admisible de la caldera, pero no menor de 100 psi (7 kg/cm^2).

49. ¿Pueden usarse el hierro galvanizado y el tubo de acero galvanizado y sus accesorios para la tubería de purga en una caldera de alta presión?

RESPUESTA: El tubo galvanizado no puede utilizarse para tuberías de purga según la normativa ASME B31.1 del Código de calderas de potencia.

Capítulo 7

FABRICACIÓN POR SOLDADURA Y TÉCNICAS NDT (NO DESTRUCTIVAS)

Hay muchas fuentes documentales que proporcionan detalles, incluyendo requisitos de soldadura, para la construcción de calderas, recipientes a presión y vasijas nucleares. Cada sección del Código tiene un capítulo sobre requisitos de soldadura. Por ejemplo, la Sección I, Calderas de potencia, tiene la parte PW titulada «calderas soldadas», que proporciona algunos requisitos para juntas soldadas y pruebas no destructivas que deben aplicarse como seguro de calidad de que una soldadura consistente ha sido realizada sobre un material en consideración. Otros documentos que pertenecen al material de este capítulo comprenden:

- Sección V, código ASME, Examen no destructivo, que proporciona detalles y requerimientos para los diferentes métodos no destructivos (NDT).
- Sección IX, Soldadura y calificaciones de refuerzos para soldadores, operadores y procedimientos de soldadura.
- ASNT's SNT-TC-1A, Práctica recomendada para cualificación y certificación de personal NDT. Esto proporciona detalles sobre calificación de los tres niveles de clasificación reconocidos por esta vía.

La sociedad americana para ensayos no destructivos, ASNT, ha publicado ahora otro nuevo documento para complementar la guía maestra SNT-TC-1A mediante una norma de cumplimiento absoluto, y no una guía, llamada ANSI/ASNT CP-189-1991 y titulada «norma para calificación y participación del personal de pruebas no destructivas». Esto exige certificado de técnicas NDT al personal para la normativa reconocida.

Conexiones roscadas y expandidas. El Código permite conexiones roscadas para la utilización en uniones de piezas de caldera, pero están limitadas a diámetros de tubo de 3″ (75 mm), y no pueden utilizarse para presiones de más de 100 psi (7 kg/cm^2). Las uniones por expansión son usadas en tuberías, pero no pueden exceder de 6″ (150 mm) de diámetro exterior.

UNIONES POR SOLDADURA

La soldadura es el método clave empleado en la fabricación de calderas y recipientes a presión. Los materiales utilizados en la construcción de calderas de potencia y piezas sometidas a presión deben limitarse en aquella sección como material admisible y con la especificación correspondiente como se lista en la Sección II del Código. El acero al carbono o aleado teniendo un contenido de carbono de más del 0,35 por 100 no puede utilizarse en construcción soldada. La soldadura requiere ciertos procedimientos, y los operarios y soldadores deben estar cualificados en orden a poder cumplir la normativa de soldadura. La NB (National Board) de inspectores exige también que la soldadura esté calificada según el Código siempre que se realizan reparaciones sobre piezas a presión. Los contratistas o reparadores pueden obtener un sello «R» de la NB si sus organizaciones pueden demostrar el cumplimiento de los requisitos de reparación NB.

El personal de operación de calderas de mantenimiento y de inspección debería tener conocimiento de trabajo del código de soldadura, porque éste se ha convertido en requisito legal en muchas jurisdicciones que han adoptado los requisitos del código ASME o normas NB para reparaciones permitidas.

Métodos de soldadura. La soldadura se define como una unión por coalescencia localizada (fusión conjunta) o consolidación del metal donde se realiza una unión por calentamiento a temperatura de fusión, con o sin la aplicación de presión, y con o sin la utilización de material de relleno. El material de relleno, cuando se usa, debe tener propiedades próximas a las del metal de base, incluyendo el punto de fusión. La soldadura es aquella parte que ha sido fundida junta durante el proceso de soldadura. La junta soldada es la unión de dos o más metales producida por el proceso de soldadura. Refuerzo soldado es metal soldado en exceso sobre el estrictamente necesario para rellenar una junta y para soldar a tope la rotura o surco acanalado. Es el metal de soldadura depositada más allá de la base nivelada o superficie metálica de base lo que se considera refuerzo.

El refuerzo de soldadura está permitido por la Sección I como ayuda para tener una penetración completa de junta de los metales que están siendo soldados. Sin embargo, el Código limita la altura del proceso, dependiendo del espesor de la chapa. Por ejemplo, para un rango de espesor de chapa de 2″ a 3″ (50 a 75 mm), el máximo refuerzo es de alrededor de 1/4″ (6,25 mm). El Código también exige que las superficies a soldar estén libres de estrías gruesas, surcos, solapes, lomos y valles o hendiduras para evitar la concentración de tensiones. La superficie de la soldadura deberá también ser correcta y adecuada para que pueda hacerse una buena interpretación de las pruebas radiográficas y otros tests NDT que puedan ser realizados. El amolado del exceso de refuerzo de soldadura se aplica normalmente cuando las interpretaciones de las técnicas NDT a la junta puedan presentar dificultades. Los anillos traseros si se usan sobre una junta o unión longitudinal de un tubo, virola o calderín, deben retirarse.

Los anillos traseros de una junta circunferencial pueden no tener que retirarse si se cumplen y no se exceden ciertos tamaños normalizados, y siempre y cuando no se requiera un examen radiográfico de la junta.

El método más común de soldadura de piezas a presión es por fusión del metal, siendo suministrado el calor por uno de los distintos métodos. La soldadura al arco, soldadura por gas y soldadura con termita están clasificadas como soldaduras de fusión, pero la soldadura al arco eléctrico es la más corriente.

La soldadura de arco es una fusión localizada y progresiva de los bordes unidos y presentados juntos para que fluya dicha soldadura sobre las partes metálicas base, y causada por el calor producido por un arco eléctrico entre un electrodo metálico o varilla y el metal de base. Ambos, el material soldadura (electrodo o varilla de soldar) y el metal adyacente de base, son fundidos por el arco. Al enfriar, se solidifican, uniendo así las dos piezas con un material continuo.

En la *soldadura metálica de arco*, las varillas de soldadura pueden ser de dos tipos: electrodos desnudos y electrodos revestidos. La soldadura de arco en tramo liso o llano utiliza electrodos desnudos. La soldadura de arco con escudo o protección utiliza electrodos revestidos. La razón es que el flujo o revestimiento sobre el electrodo protege al metal depositado de la oxidación (Fig. 7.1*a*). Así, a medida que el electrodo funde, se obtiene una soldadura más fiable que con electrodos desnudos. La soldadura metálica de arco protegido se conoce previamente con el nombre de SMAW.

Los electrodos revestidos proporcionan un gas protector para proteger la soldadura de la contaminación de la atmósfera, como oxígeno, humedad y dióxido de carbono. Estos contaminantes puedan producir porosidad, formación de grietas y burbujas de óxido de la soldadura. El *gas protector* se utiliza en la soldadura de arco de gas al tungsteno, soldadura de arco con gases metálicos y procesos similares que emplean electrodos desnudos de material de relleno. El *gas de purga* se utiliza para reemplazar el aire no deseado y otros vapores contaminantes y proteger la raíz de la soldadura sustituyéndolos por un gas que proteja de la oxidación durante la soldadu-

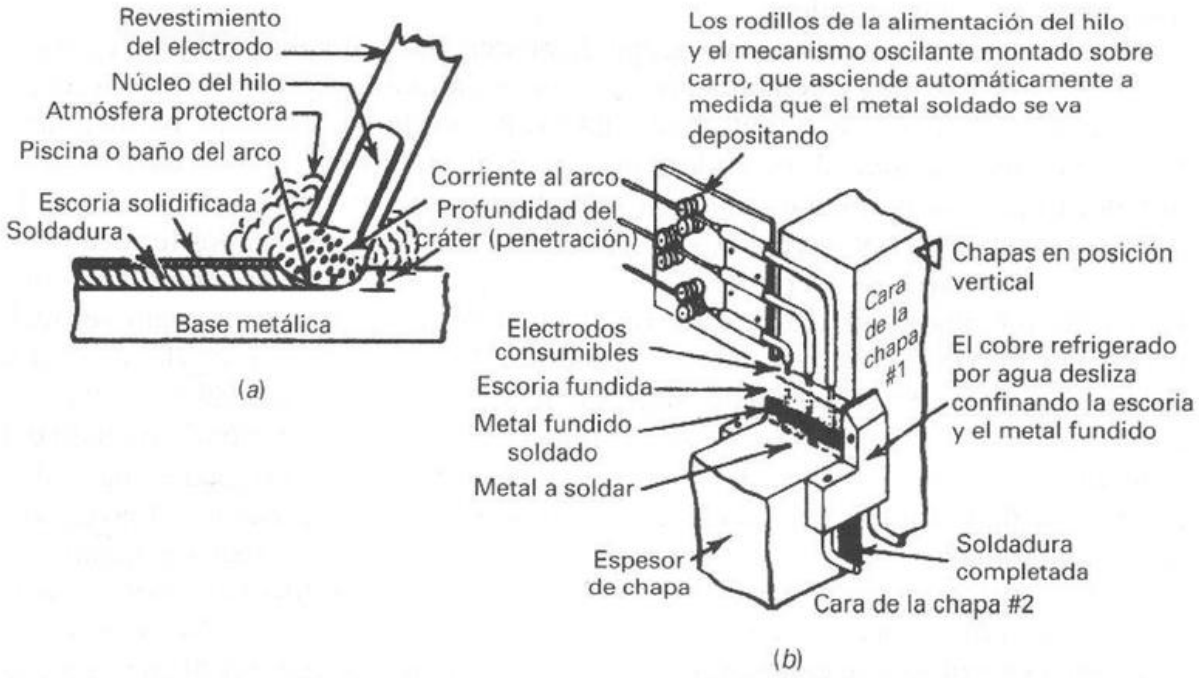


Figura 7.1. (*a*) Soldadura metálica de arco. (*b*) Elementos básicos de la electrosoldadura con escoria.

ra. Se utiliza el argón para hacer de escudo protector, así como el helio. Este sistema se recomienda cuando se suelda acero inoxidable, aleaciones de níquel y la mayoría de los metales no ferrosos.

En la *soldadura de arco sumergido*, la coalescencia (fusión conjunta) se produce por calentamiento con un arco o arcos eléctricos entre un electrodo de metal desnudo y el metal de trabajo. La soldadura está protegida por el flujo, que es una protección de material granular, fusible sobre el trabajo a soldar. No se utiliza presión y el material de relleno se obtiene del electrodo o a veces por una varilla suplementaria de soldadura.

En la *soldadura al arco de tungsteno*, la coalescencia se produce por calentamiento con un arco eléctrico entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y el trabajo o base. La protección se obtiene de un gas o mezcla de gases (que puede contener un gas inerte). El metal de relleno normalmente se añade por separado del electrodo. Este proceso se llama también soldadura de tungsteno al gas inerte (TIG). Si no se utiliza metal de relleno, el proceso se denomina también soldadura autógena. Los electrodos de tungsteno se clasifican sobre la base de su composición química como: de tungsteno puro, electrodo de tungsteno zirconiado, electrodo de tungsteno al boro, y así sucesivamente. La AWS (sociedad americana de la soldadura) ha desarrollado un sistema de marcaje y numeración para los diferentes tipos, desde EWP a EWG, incluyendo colores de marcaje que van del verde al gris.

La *soldadura por gas* es un grupo de procesos de soldadura en los cuales la coalescencia se produce por calentamiento con una llama o llamas de gas con o sin aplicación de presión. El material de relleno se añade (normalmente) a los metales de base calentados que se van a soldar.

La *soldadura oxiacetilénica* es un proceso de soldadura por gas en el que la coalescencia se produce por calentamiento con una llama a cerca de 6.000 °F (3.300 °C), obtenida por la combustión del gas acetileno con el oxígeno a medida que se añade metal de relleno.

La *soldadura por termita* es un grupo de procesos de soldadura en que la coalescencia se produce por calentamiento con metal líquido sobrecalentado y escoria resultante de una reacción química entre un óxido metálico y aluminio. Normalmente no se aplica presión. El metal de relleno, cuando se utiliza, se obtiene del metal líquido. El proceso termita es útil para soldaduras muy pesadas, como piezas de 3″ (76 mm) y mayores; por ejemplo se usa para soldadura de carriles en los ferrocarriles.

En la *soldadura con electroescoria* (véase la Figura 7.1*b* de la página anterior), las piezas son unidas en una pasada con el canal de soldadura en un plano vertical. La escoria en la parte superior del canal conduce el arco eléctrico que genera el calor requerido para fundir la escoria por flujo y el metal de relleno (soldadura de relleno). Una corriente de agua de refrigeración se utiliza para confinar el acúmulo fundido del flujo, metal de relleno y metal de base dentro de la garganta de la soldadura hasta que esté terminada y solidificada. Las tasas de depósito son elevadas con este tipo de soldadura. La soldadura se considera con estructura de grano grueso y requiere tratamiento térmico posterior para afinar la estructura del grano y zonas afectadas por el calor.

Algunos otros procesos de soldadura son la *soldadura de chorro eléctrico*, donde un chorro concentrado de electrones a alta velocidad genera un calor de fusión sobre la superficie a unir; la *soldadura por arco de plasma* es un proceso de fusión con gas inerte usando un arco constreñido, similar al proceso de arco al tungsteno; y la *solda-*

dura y corte por láser, que se consigue mediante la energía luminosa concentrada en un chorro a través de un dispositivo óptico denominado láser. La fuente de radiación en un láser está concentrada con sólo una pequeña divergencia del chorro, lo que da por resultado unas altas densidades o intensidades de energía de hasta 10^9 W/cm^2.

La Sección I del código ASME permite que los siguientes procesos de soldadura se usen en calderas de potencia: arco metálico protegido, arco metálico sumergido (SAW), arco metálico de gas (GMAW), arco de gas al tungsteno (GTAW), arco de plasma, arco metálico de hidrógeno atómico, oxihidrógeno y oxiacetilénico. Los procesos de soldadura por presión permitidos son el de «flash», inducción, resistencia, presión con termita y presión con gas.

Las *soldaduras por puntos* (o filetes) se hacen bajo ciertas tolerancias a seguir y es necesario a este respecto describir los términos garganta, pie, cara, altura o ancho y raíz (véase la Figura 7.2, que muestra un punto o filete de soldadura completamente soldado). Los términos se definen a continuación. La *garganta* de una soldadura es la distancia más corta desde la raíz de la misma a la cara. El *talón* es la junta entre la cara de la soldadura y el metal de base. La *cara o frente* de una soldadura es la superficie expuesta del lado que se hace o se ve la soldadura. La *raíz* de una soldadura es la parte más profunda donde comienza la soldadura que intersecciona a las superficies del metal base. El *ancho o alto* de la soldadura es la distancia desde la raíz de la junta al talón de un punto o filete. Las soldaduras de garganta se usan ampliamente para unir soldaduras a tope (Fig. 7.2*a*).

Soldadura a tope doble. En la soldadura a tope doble, el metal se deposita en la garganta de la soldadura por ambos lados de la chapa, mientras que en la soldadura a simple tope el metal se deposita sólo en un lado. La soldadura a tope sobre juntas longitudinales de calderines siempre está permitida, supuesto que se usa una banda o pletina para asegurar una penetración total de la soldadura en la junta. Pero la soldadura a tope simple puede usarse solamente donde el interior (la cara interior) de la soldadura donde es inaccesible para el soldador. Sobre juntas de unión longitudinales, la pletina dorsal debe retirarse.

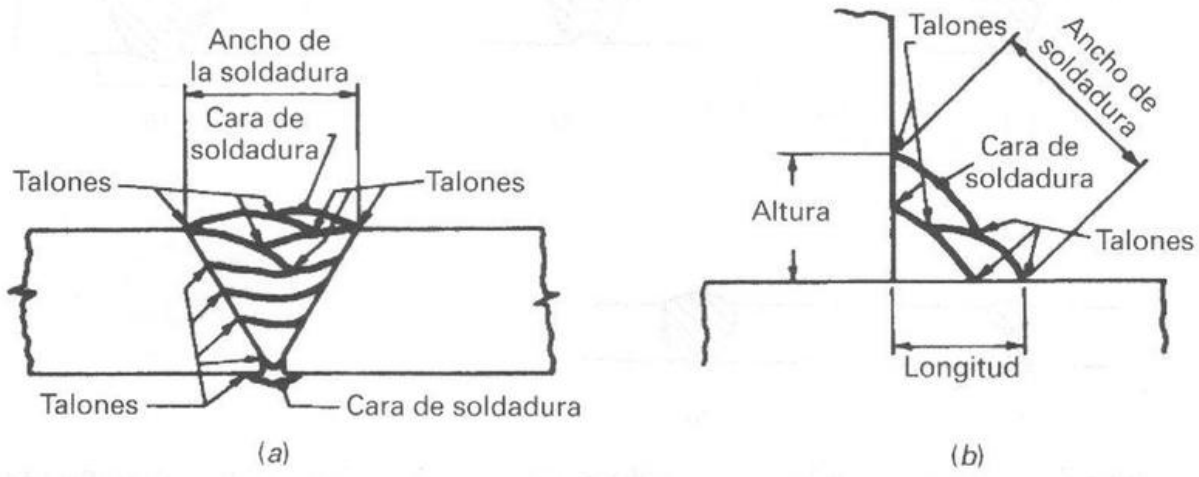


Figura 7.2. Terminología de la soldadura para soldadura a tope y con material de relleno. (*a*) Detalles descriptivos de la soldadura a tope. (*b*) Detalles descriptivos de la soldadura por puntos.

Después de que la primera cara de una doble junta soldada ha sido efectuada, la segunda cara debería limpiarse, amolarse (desgastar o pulir con muela) o limpiarse por fusión para asegurar una superficie limpia de forma adecuada, para asegurar la fusión del metal soldado sobre este lado, sin porosidad, escorias o poros. Los metales de base deberán estar limpios y libres de grasa, óxido o pintura u otras sustancias extrañas. A veces, antes de soldar, se especifica limpiar los metales base con una capa de aceite de linaza.

Problemas de soldadura. Hay ciertos problemas de soldadura que los buenos procedimientos de soldadura y soldadores expertos tratan de evitar. La Figura 7.3 lista algunos defectos comunes de soldadura y los pasos a tomar para evitarlos. Un problema muy común es el de las *inclusiones de escoria*. Ésta es un material sólido no metálico atrapado en una soldadura o entre el metal base y la soldadura metálica. La escoria es perjudicial porque impide y aminora la resistencia de una unión soldada basada en las características del metal. La *porosidad* de una soldadura son los vacíos o bolsas de gas dejados en ella, como resultado de un proceso incorrecto o de dificultades durante dicho proceso. Cuando tiene lugar la fusión, los metales de base soldados están afectados en una zona denominada zona afectada por el calor (HAZ). La zona afectada por el calor es aquella zona del metal de base que no ha sido fundida pero donde las posibles propiedades estructurales del metal base han sido alteradas por el calor de soldadura (o corte).

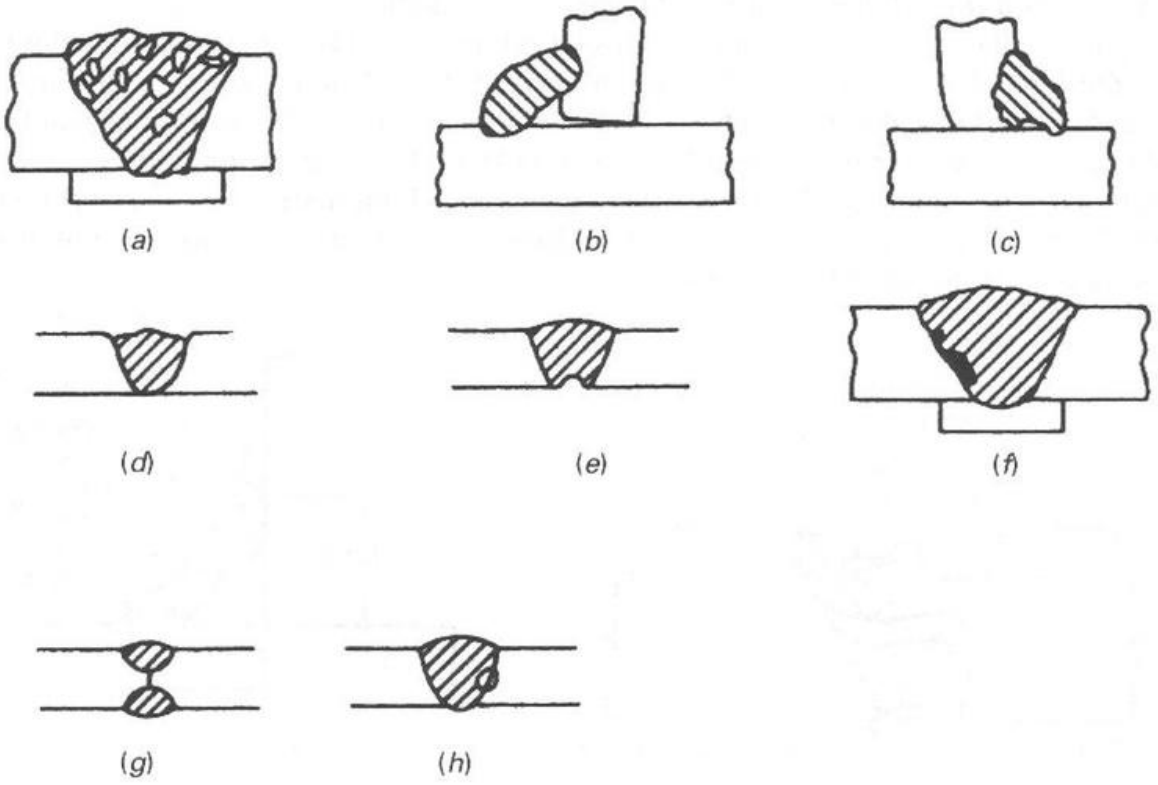


Figura 7.3. Algunos defectos de soldadura: (*a*) porosidad; (*b*) penetración inadecuada; (*c*) fusión incompleta; (*d*) soldadura incompleta; (*e*) cavidad en raíz; (*f*) inclusión de escorias; (*g*) penetración incompleta de la raíz; (*h*) función lateral incompleta.

La *tensión residual* es aquella tensión interna remanente en el metal fundido y materiales adyacentes de base cuando se ha realizado una soldadura. Ha sido causada por el alto calor concentrado en la soldadura comparado con el del metal más frío. Esto es la sede de un gradiente térmico, que lleva a una dilatación y contracción no uniformes, lo que induce tensiones internas en la soldadura. El martilleo y el tratamiento térmico reducirán las tensiones residuales. Esto se denomina *descarga de tensiones* o tratamiento térmico posterior a la soldadura.

Las *grietas* en las soldaduras se ilustran en la Figura 7.4 y son causadas normalmente por alguna forma de dilatación y contracción durante la soldadura. Sin embargo, cada tipo de grieta tiene sus causas específicas, incluso aunque las grietas se dividen en dos categorías: 1) grietas en caliente que ocurren antes de la solidificación de la soldadura, y 2) grietas en frío que tienen lugar después de que la solidificación ha terminado. Las grietas no están permitidas por el Código en la soldadura, porque este tipo de discontinuidad tiene la capacidad de propagarse y producir serios fallos en piezas sometidas a presión. Las grietas son también producidas por cambios metalúrgicos en el proceso de soldadura que hacen frágil a la junta soldada, especialmente en la zona afectada por el calor de la soldadura. La capacidad de formar una estructura frágil en la HAZ aumenta a medida que lo hace

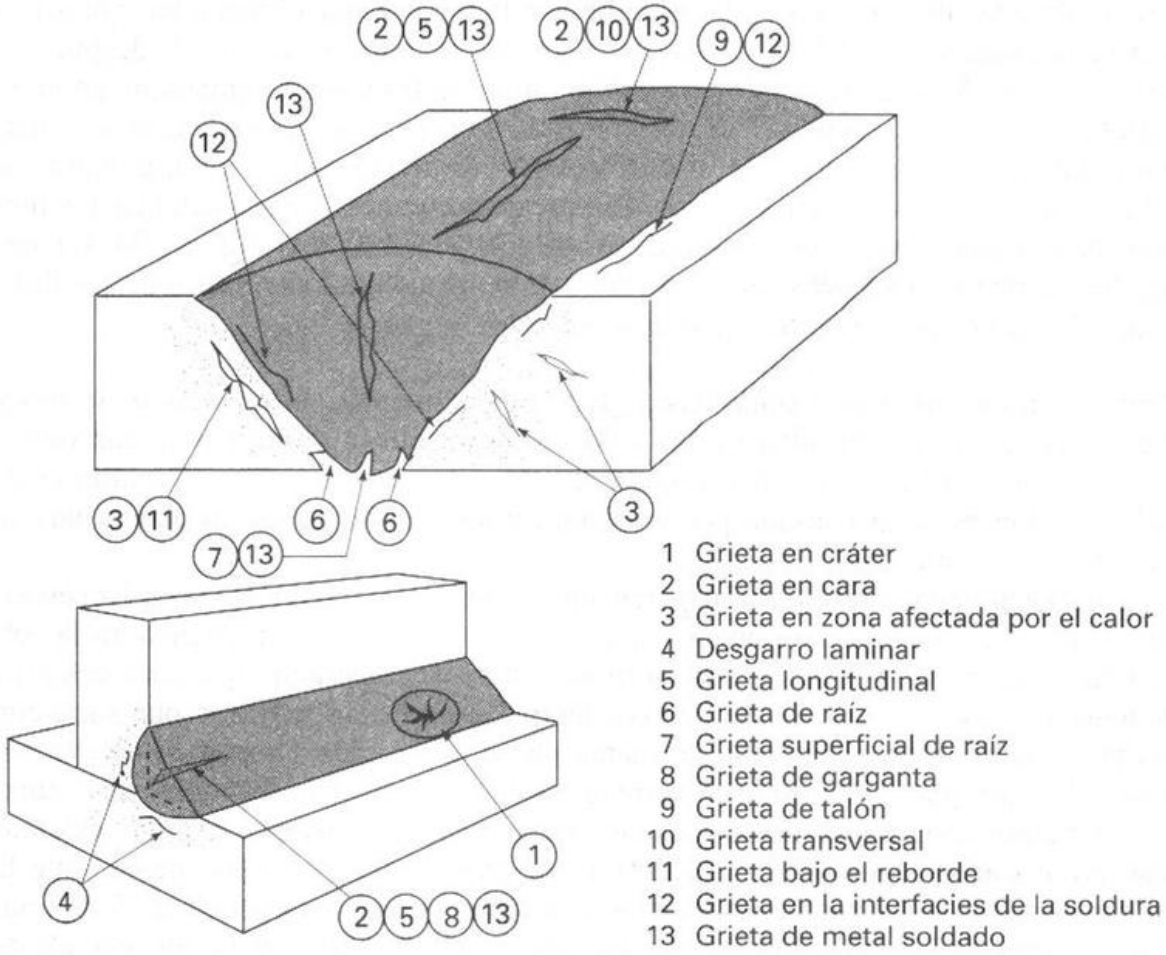


Figura 7.4. Las grietas en las soldaduras tienen múltiples causas. El Código no permite que las grietas permanezcan sin corregirse, porque actúan como concentradoras de tensiones para ulterior propagación de la grieta.

el contenido de carbono y aleación del metal base, porque el alto contenido de carbono aumenta la dureza y disminuye la ductilidad de la HAZ. Este tipo de grieta puede ser evitado usando electrodos de bajo contenido de hidrógeno, utilizando el precaldeo y realizando una buena preparación y limpieza de la junta a soldar, dejándola libre de humedad, grasa, aceite y cualquier otro compuesto hidrocarbonado. En muchos casos debe usarse un tratamiento térmico después de realizada la soldadura.

Los defectos en soldadura normalmente pueden repararse por amolado, lijado de la sección de defectuosa (vacíos, grietas térmicas, falta de penetración, etc.) para sanear el metal y después volver a soldar. Generalmente deben usarse ensayos o pruebas no destructivas para estar seguro de que la sección defectuosa ha sido totalmente eliminada; la reparación también tiene que comprobarse por ensayos no destructivos. Las aberturas o agujeros (de hombre) están permitidos en las uniones de calderas soldadas. Sin embargo, la soldadura debe haber sido descargada de tensiones y radiografiada y la soldadura de la abertura debe examinarse para comprobar la no existencia de grietas en ambos lados por el método de partículas magnéticas.

Precalentamiento. El precalentamiento se recomienda por los ingenieros de soldadura para los aceros aleados en orden a reducir el nivel de diferencia térmica que existe entre el metal base de la zona próxima a la soldadura y el baño de soldadura. Esto evitará posibles grietas en la soldadura en la medida que el metal base más frío resista la contracción del metal de la soldadura cuando se caliente y después se enfríe. El uso del precalentamiento también aminora las tasas de enfriamiento en el metal de la soldadura y en la HAZ, produciendo una estructura metalúrgica de soldadura más dúctil y haciendo que el hidrógeno se difunda o salga fuera, evitando la rotura o agrietamiento por hidrógeno. El precalentamiento implica calentar los metales base a una temperatura de alrededor de 150 °F a 400 °F (65 °C a 204 °C), dependiendo de los materiales soldados, antes de la soldadura. Esto reduce las posibilidades de tensiones residuales cuando se efectúe la misma.

Tratamiento térmico post-soldadura. Este procedimiento aminora las tensiones y mejora la resistencia elástica de las soldaduras metálicas de aceros al carbono y aceros aleados. El concepto del tratamiento térmico post-soldadura es relajar cualquier tensión residual causada por soldadura y temple del metal, lo que evitará la fragilidad y rotura.

Adicionalmente a la relajación de tensiones, el post-calentamiento se utiliza en los aceros de aleación baja para obtener una estructura de grano homogéneo en la soldadura y metal base por tratamiento térmico a mayor temperatura que para descarga de tensiones, lo que puede ser seguido de temple a temperatura menor, que varía con el tipo de acero. Dependiendo de los metales base implicados, el tratamiento térmico post-soldadura puede mejorar, no cambiar nada o degradar la tenacidad de rotura.

El tratamiento térmico post-soldadura o relajación de tensiones requiere calentar una unión soldada de 1.100 °F a 1.200 °F (de 593 °C a 649 °C) después de que la unión esté soldada y mantener esta temperatura durante una hora por cada 25 milímetros de espesor. Todo el recipiente o solamente la unión soldada debe ser relajada de tensiones. Es una práctica común completar todas las soldaduras y después rebajar las tensiones de todo el recipiente. La descarga de tensiones afecta a la estructura metálica en su forma cristalina y así reduce la concentración de tensiones residuales en la

soldadura. Después de que se ha mantenido la temperatura requerida por el tiempo especificado, el enfriamiento hasta 600 °F (315 °C) debe ser gradual, después de lo cual el metal puede ser enfriado hasta la temperatura ambiente. El *martilleo* es un trabajo mecánico del metal por medio de golpes de martillo de modo que se reduzcan las tensiones residuales de una junta soldada producida por el calor de soldadura.

Consideraciones metalúrgicas. Algunas consideraciones metalúrgicas puede hacerse cuando uno contempla un proceso de soldadura. Deben tenerse en cuenta las siguientes:

1. Soldabilidad de las piezas a unir. El Código puede imponer restricciones severas.
2. Condiciones de superficie necesarias y compatibilidad de las propiedades químicas y mecánicas de los metales base al proceso de soldadura que se está utilizando. La humedad de la superficie de los metales ferrosos así como en el electrodo puede dar lugar a porosidad y grietas por hidrógeno en forma de burbujas.
3. La semejanza de los materiales de relleno o electrodos y los metales de base para evitar posible fragilidad de la soldadura.
4. Adecuación del proceso de soldadura para el tipo, espesor y aleaciones de los metales a soldar.
5. Evaluación de los efectos del precalentamiento y tratamiento térmico post-soldadura. Para metales con altas tasas de dureza, un enfriamiento lento evitará el agrietamiento de la zona afectada por el calor. La matriz cúbica centrada en las caras del material puede desarrollar estructuras de grano cristalino grueso cuando se enfría lentamente.
6. Flujos. Flotan mezclados cuando se funden sobre la parte superior de los metales líquidos, protegiendo o haciendo de escudo de los metales respecto a la atmósfera. Las reacciones químicas entre el metal y los flujos son posibles en las interfaces. Si el flujo es alto el dióxido de silicio (SiO_2) es posible una reacción química que pueda producir mayor porcentaje de silicio en el metal soldado de lo previsto.

Pruebas normalizadas de soldadura. La Sección IX del código ASME de calderas y recipientes a presión contiene detalles sobre especificaciones que deben prepararse por el fabricante y las pruebas que deben hacerse por un soldador para ser considerado soldador cualificado.

Debería ser apropiado definir los términos: prueba de tensión en la sección reducida; prueba de doblado libre; prueba de doblado o flexión de raíz; prueba de doblado o flexión de la cara, y prueba de doblado o flexión lateral, ya que son utilizados intensivamente en las calificaciones de soldadura normalizadas. Véase el código ASME, Sección IX, para especificaciones típicas de pruebas de soldadura. Las pruebas de tensión en la sección reducida se utilizan para calificar el proceso que, en taller o local del contratista, se usan para soldar. Cuando se rompen bajo presión, debe tener una última resistencia o tracción al menos del rango mínimo de la chapa que se suelda (material base) y la elongación debe ser de como mínimo del 20 por 100.

La prueba de doblado lateral o flexión lateral se usa para calificar soldadores. El espécimen se somete a flexión contra el lado de la soldadura. En el test de flexión de

cara (véase la Figura 7.5) el espécimen es sometido a flexión contra la superficie o cara de la soldadura. En el test de flexión de raíz, el espécimen es sometido a flexión contra la parte inferior o raíz de la soldadura. El test o prueba de flexión libre es una prueba de calificación del procedimiento en taller o lugar de la contrata. La prueba consiste en el doblado o flexión en frío de un espécimen y las fibras exteriores de la soldadura deben alargarse (sin agrietarse ni romperse) al menos un 30 por 100 antes de que la rotura tenga lugar.

Para pasar cada prueba, los especímenes, guiados a flexión no deben presentar grietas u otros defectos abiertos que excedan de 1/2" (12,2 mm) medidos en la dirección de la superficie convexa del espécimen después de la flexión, excepto que las grietas aparezcan en las esquinas del espécimen durante la prueba y que no se consideran a no ser que estas ocurran por inclusiones de escoria u otros defectos técnicos de soldadura.

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Cada fabricante o contratista que construye una caldera por soldadura según el Código está obligado a llevar el registro del detalle del procedimiento seguido. Cada procedimiento requiere prueba de las soldaduras realizadas por tests de especímenes de sección reducida y especímenes de flexión o doblado guiado. Las variables que requieran un nuevo procedimiento y nuevas chapas de prueba son muy numerosas. Entre éstas están los cambios en los materiales de base, agrupados en Aplicaciones de soldadura ASME (Sección IX) en los números «P». Por ejemplo, P-1 incluye los aceros al carbono, P-2 se utiliza como hierro bruto, pero no está listado más, P-3 consta de aceros al cromo-molibdeno, con contenido de cromo por debajo del 0,75 por 100 y con un total de contenido de aleación no mayor del 2 por 100. El rango de números P llega hasta P-10, de modo que las variables de material base en el procedimiento de calificación es grande.

La siguiente variable es el electrodo y selección de la varilla de soldadura, con rangos desde F-1 a F-7. Cada cambio en la selección de electrodo por varilla de solda-

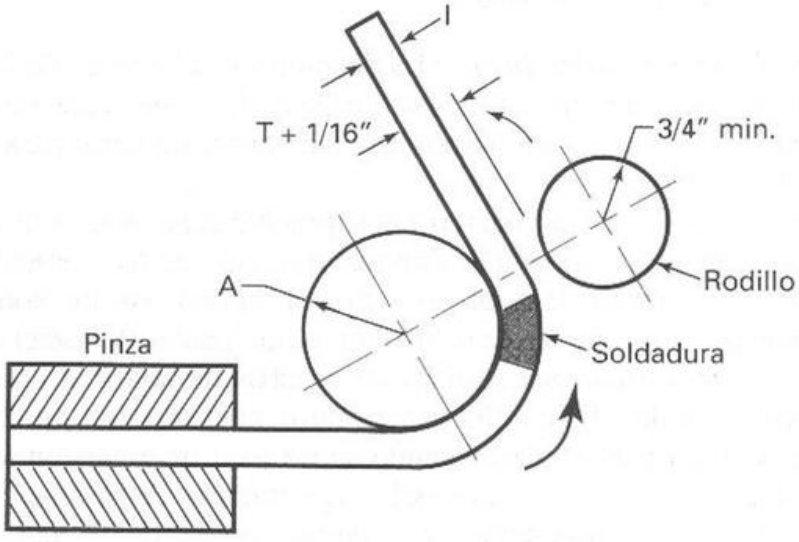


Figura 7.5. Las pruebas mecánicas de soldadura incluyen flexión guiada de las soldaduras de garganta. La ilustración es de la prueba de doblado de cara.

dura requiere un nuevo conjunto de pruebas de chapas o proceso de fabricación. El metal de la soldadura se clasifica por análisis del metal, según los números desde A-1 hasta A-8. Éstos se relacionan con los numerosos P equivalentes del material base. De nuevo los cambios del metal soldado de la clasificación del metal más equivalente requieren un nuevo conjunto de test de chapas o procedimiento de cualificación.

El espesor de la chapa o tubo a soldar es otra variable. La clasificación va desde 1/16″ a 3/8″ (1,59 a 9,53 mm), desde 3/8″ a 3/4″ (9,53 a 19 mm) y de más de 3/4″ como se ve en el Código. El código ASME de soldadura especifica otras variables a considerar al requerirse un nuevo procedimiento de cualificación y prueba, y éstas deberían consultarse para variables específicas.

En las soldaduras de garganta, se requiere para calificación del soldador una prueba de flexión o doblado de cara y una prueba de flexión o doblado de raíz para cada posición de soldadura. Para soldadura por puntos se precisa una prueba de chapa según el Cógido, pero pasando la prueba de soldadura de garganta también se clasifica al soldador para soldadura por puntos. La calificación del procedimiento requiere pruebas de flexión de dos caras, pruebas de flexión de raíz y dos test de tensión en la sección reducida, como se ilustra en el Código de calificación de soldadura de la ASME.

Cualificación del soldador. Un soldador cualificado es alguien que es capaz de realizar soldaduras manuales o semiautomáticas. Un operario de soldadura es el que opera una máquina o equipo de soldadura automática. El Código de trabajo de calderas exige la utilización de un soldador cualificado en la mayoría del trabajo donde se realizan soldaduras según el Código.

La prueba de cualificación puede ser realizada por los fabricantes o contratistas responsables. En los trabajos sobre recipientes a presión, debe certificarse y calificarse también el procedimiento de soldadura del fabricante o contratista antes de que el soldador pueda ser calificado. Bajo otros códigos o normativas esto no es necesario. Para llegar a esta cualificación un soldador debe realizar soldaduras específicas, utilizando el proceso de soldadura exigido, el tipo de metal, espesor, tipo de electrodo, posición (véase la Figura 7.6 de la página siguiente) y diseño de junta. Los especímenes de prueba deben estar hechos a tamaños normalizados y bajo la observación de una persona cualificada. En la mayoría de las especificaciones gubernamentales un inspector gubernativo debe testificar la ejecución de los especímenes de soldadura. Los especímenes deben estar también adecuadamente identificados y preparados para las pruebas. La prueba común es el test de flexión guiado. Sin embargo, los exámenes de rayos X, pruebas de rotura u otras pruebas también se utilizan. La ejecución satisfactoria de las pruebas de especímenes cualificará* al soldador para tipos específicos de soldadura. La certificación según el Código, en general está basada en el rango del espesor a soldar, las posiciones a utilizar y los materiales a soldar.

Recuerde. La soldadura de piezas de caldera está bajo control cerrado de las muchas variables implicadas en la soldadura, de modo que compruebe el código de soldadura ASME**. Recordamos de nuevo los siguientes puntos:

---

* Supuesto que cumplan las normas de aceptabilidad.

** En España, «Reglamento de Aparatos a Presión e Instrucciones Técnicas Complementarias» del MINER.

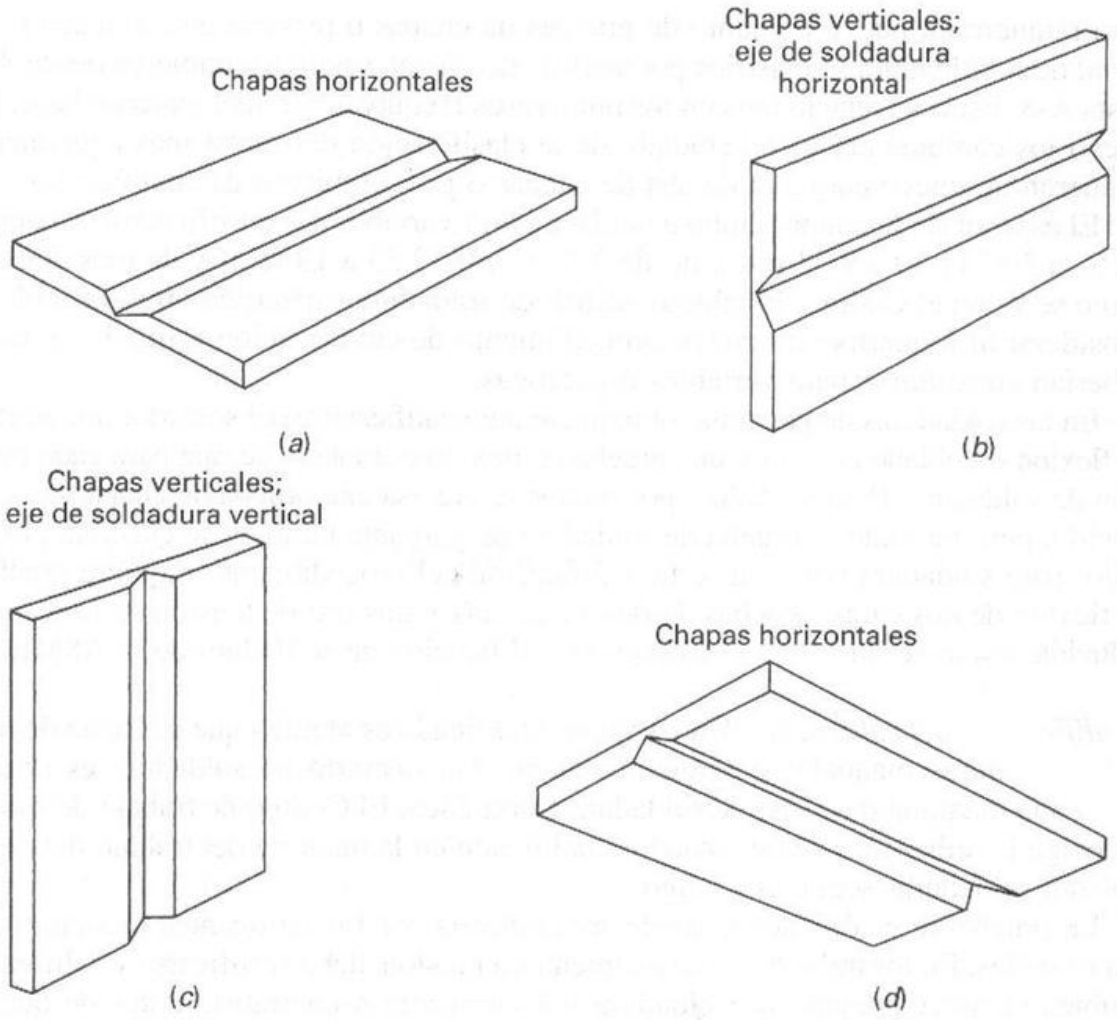


Figura 7.6. Código de posiciones de soldar para soldaduras de garganta utilizadas para cualificar operadores. Posiciones de las pruebas: (*a*) 1G; (*b*) 2G; (*c*) 3G; (*d*) 4G.

1. El fabricante o contratista que sigue el Código de soldadura en calderas y recipientes a presión (o vasijas nucleares) es responsable de dirigir las pruebas del procedimiento de cualificación y las cualificaciones de los soldadores para el trabajo hecho por su organización.
2. Las cualificaciones de los soldadores permanecen efectivas en tanto en cuanto el soldador esté empleado por el mismo fabricante u organización y para las soldaduras de modo continuo. Pero si el soldador cambia de empleo, ya no se le considera más como cualificado, y así debe realizar las pruebas de nuevo. Si el soldador no ha hecho ninguna soldadura en un período de más de seis meses en la posición, material, etc., para las cuales fue cualificado, debe ser recualificado.
3. El fabricante o contratista es responsable de mantener todos los registros de procedimiento y pruebas de cualificación de soldadores. Éstas son necesarias como evidencia del taller o habilidad del soldador para hacer aceptable su trabajo según el Código. Un inspector autorizado según el Código tiene derecho, sin embargo, a preguntar o exigir otras pruebas si hay razón para creer que la soldadura no es aceptable según los requisitos normativos.

4. El fabricante o contratista debe asignar numeros identificativos, letras o símbolos para cada soldador cualificado y operario de soldadura, de forma que el trabajo del soldador u operario de soldadura podrá ser identificado y retomado si es necesario.

Los soldadores no cualificados pueden ser utilizados en calderas construidas según normativa legal para soldar piezas cuya resistencia en la caldera no depende en ningún modo de la soldadura y, adicionalmente, el efecto térmico de la soldadura no afecte en modo alguno a la resistencia de las piezas o componentes o sea asiento de tensiones en partes adyacentes a la zona que está siendo soldada.

No es permisible soldar cualquier tipo de acero para piezas de calderas a presión. Debe ser material admitido por la normativa legal y también debe ser acero al carbono o aleado de un contenido de carbono de no más del 0,35 por 100. Esta regla también se aplica al corte oxiacetilénico u otros procesos de corte térmico.

Los calderines soldados de caldera pueden tener una distorsión limitada. El calderín debe ser circular en cualquier sección dentro del límite del 1 por 100 del diámetro medio. Si es necesario para cumplir este requisito, las chapas deben ser calentadas, relaminadas o reformadas. Los hogares deben ser laminados (en calderas escocesa marinas o de hogar interior) con una desviación máxima de la circunferencia real de no más de 1/4″ (6,35 mm).

Las chapas de espesor desigual pueden soldarse supuesto que haya una sección de transición intermedia, que tendrá una longitud no menor de tres veces la diferencia entre las superficies de chapa adyacentes, y supuesto que las juntas o uniones entre chapas difieran en espesor no más de 1/4 del espesor de la chapa más fina, o no más de 1/8″ (3,2 mm).

Hay muchos requisitos normativos detallados en la Sección I del Código, así como requisitos en el Código de calderas de calefacción, Sección IV. Además los requisitos generales de soldadura estan cubiertos extensamente en la Sección IX del Código, que debería ser revisada para ver los detalles sobre los requisitos.

INSPECCIONES DE SOLDADURA EN CAMPO

Las siguientes son algunas áreas que el personal de planta debería cubrir o cumplimentar cuando se revisan las soldaduras realizadas en su planta:

1. Conformidad del proceso de soldadura que esté siendo utilizado con las especificaciones del procedimiento escrito.
2. Extensión de la limpieza de una junta previamente a su soldadura para asegurar una soldadura perfecta.
3. Precalentar y mantener las temperaturas de transición y ver cómo son éstas en comparación con los requisitos del Código para los materiales que están siendo soldados.
4. Preparación de la junta y conformidad con las especificaciones del Código y dimensionales escritas.

5. Material de relleno y adecuación para el proceso de soldadura y el material que está siendo soldado según requisitos del Código.
6. Martilleo, amolado y vaciado que se llevan a cabo después de cada pasada de soldadura para eliminar escorias e impurezas.
7. Refuerzo de la chapas durante la soldadura para controlar la distorsión.
8. El tratamiento térmico después de la soldadura debe ser realizado y cumplido según el Código y los requisitos de temperatura y tiempo de mantenimiento de la misma.
9. Cualificación de los soldadores que hacen el trabajo y la correspondiente documentación a cumplimentar por el fabricante o contratista.

NORMAS DE SEGURIDAD

La AWS (American Welding Society) ha publicado muchas líneas maestras a seguir como normas recomendables de seguridad al realizar las soldaduras de campo. Entre éstas están las siguientes:

1. Los gases y humos generados por una soldadura requieren adecuada ventilación alrededor del lugar donde se efectúa.
2. La radiación en forma de luz ultravioleta del arco de soldadura requiere el uso de filtros para proteger los ojos y vestido adecuado para proteger la piel.
3. El ruido producido por el trabajo requiere utilizar protección de oídos en forma de casco u orejeras.
4. El levantamiento de piezas pesadas exige seguir las reglas establecidas de seguridad sobre prácticas adecuadas de elevación.
5. Las descargas eléctricas deben evitarse estando seguros de que el equipo está conectado a tierra adecuadamente y de que no hay contacto con partes eléctricas vivas.
6. El peligro de incendio debe evitarse con la purga adecuada de cualquier recipiente que contenga gases o líquidos combustibles. La zona contigua de toda soldadura debe comprobarse respecto a todo material combustible y los procedimientos de protección de incendios deben seguirse, incluso la vigilancia y extintores a localizar y situar en las proximidades.
7. Es esencial tener un procedimiento para el permiso de trabajo en caliente del lugar, implicando la supervisión por ambas, tanto la gerencia de la propiedad como del contratista de soldadura. La gerencia de la propiedad conoce los riesgos que pueden existir en su operación por utilizar una fuente de ignición potencial representada por toda operación de corte o soldadura.
8. La entrada en espacios cerrados según la normativa OSHA requiere procedimientos de purga y después prueba del espacio confinado para estar seguro de que hay al menos 19 por 100 de oxígeno presente en dicho espacio del recipiente o vasija. La regulación también requiere que se sigan otras normas de OSHA para entrada en espacios confinados como la de que no se ponga en peligro al personal que entre en tales espacios y que haya seguridad de socorro en caso de accidente en su interior.

PRUEBAS Y EXÁMENES NO DESTRUCTIVOS

Las técnicas modernas de inspección para asegurar la buena calidad de materiales, para detectar defectos ocultos de fabricación, para comprobar soldaduras y reparaciones y para aumentar el esfuerzo de prevención de perdidas en plantas requiere el uso de métodos de inspección por técnicas no destructivas. Las pruebas no destructivas se usan también para predecir la vida futura del equipo. Por ejemplo, la comprobación periódica del espesor de una chapa en servicio corrosivo ayudará a determinar cuándo puede tener que reducirse (ese servicio) porque la chapa haya disminuido su espesor; esto también determina que tasa hay de desgaste por año.

El término pruebas no destructivas (NDT) se utiliza para describir el método de prueba o material de inspección para determinar la solidez (o falta de defectos) para que no afecte física o químicamente al material. Las pruebas no destructivas pueden implicar los métodos siguientes: examen visual, prueba hidrostática o de fugas radiográficas, partículas magnéticas, tintes penetrantes, ultrasonidos y corrientes parásitas. También están siendo desarrolladas emisiones acústicas y pruebas holográficas, en ambos casos requiriendo la colaboración de técnicas informáticas para registrar señales y anotar cambios en las mismas de lecturas previas.

El propósito de las NDT es detectar faltas de tipo incipiente, como grietas, inclusiones, vacíos, porosidad, falta de fusión en soldaduras, laminaciones, faltas de penetración, cortes no visibles, contracciones, mermas y defectos similares de modo que se puedan efectuar reparaciones antes de que los defectos puedan producir un fallo serio en el servicio. Las propiedades mecánicas de las soldaduras se comprueban también. Éstas incluyen pruebas de flexión y de extensión, pero éstas se consideran destructivas porque tiene lugar una deformación permanente. Las pruebas de dureza se utilizan también para comprobar los cambios metalúrgicos que pueden haber ocurrido en la zona afectada por el calor (HAZ) de una soldadura, y estas pruebas pueden considerarse no destructivas.

Una breve revista de los métodos NDT empleados en fabricación y reparación de calderas es adecuada, pero los requisitos exactos están detallados en el código ASME, concretamente en la Sección V.

Inspecciones visuales. La inspección visual de una soldadura como método NDT comienza con la comprobación de si se ha usado el material adecuado según el Código. Esto se hace normalmente comparando el informe de la laminación con las marcas que lleva el material. Debe comprobarse también la selección y almacenaje de los electrodos. Los procedimientos escritos de soldadura deben revisase, así como el registro de soldadores que realizaban el trabajo. Es importante revisar la posición y alineación de las piezas a soldar para estar seguro de que cumplan las especificaciones del Código. Las soldaduras deberán comprobarse para poner de manifiesto falta de fusión de la junta, cortes anteriores y observaciones visuales de defectos semejantes. Un inspector experto detectará muchos defectos por simple inspección visual. La AWS ha establecido ahora un programa de pruebas para certificar inspectores de soldadura que cumplan un mínimo establecido de requisitos.

Un boroscopio o fibroscopio puede utilizarse en las zonas difíciles de ver de un recipiente, zonas como los tubos en un cambiador de calor. El boroscopio es un tubo

deslizante y flexible de manejo manual consistente en una serie de lentes y fuentes de luz internas que permiten visualizar una zona o pared de un recipiente que normalmente no puede verse. La llegada de la fibra óptica ha conducido al desarrollo del fibroscopio, que consiste en un conjunto de luces y fibras transmisores de imagen por el interior de un alojamiento flexible que tiene una lente ocular en un extremo. Pueden adaptarse cámaras a la lente para obtener un registro permanente de lo que se visualiza. Los defectos que pueden detectarse con tales instrumentos incluyen corrosión con pasos de gases por fluidos bloqueados, incrustaciones, ampollas y problemas similares que no podían detectarse sin la ayuda de esta inspección visual.

Examen radiográfico. La inspección radiográfica incluye los rayos X y rayos gamma obtenidos a partir de isótopos, como el cobalto 60 y el iridio 192 cuya energía radiante puede ser controlada con seguridad. El método radiográfico de prueba básicamente implica el paso de radiaciones a través del material que se quiere probar. Los rayos inciden sobre una película o pantalla y por visión del contraste es posible para un radiografista experto detectar y detallar la estructura interna del objeto sometido a prueba. El punto focal es una pequeña zona en el tubo de rayos X desde la cual emana la radiación. En radiografía gamma, un isótopo como el cobalto 60 es la fuente o foco de radiación. Cuando se usan isótopos radiactivos, la intensidad en curios es importante, así como el tamaño físico de la fuente. A menor fuente de radiación, más cercano debe colocarse el material; al mismo tiempo, cuanto menor es el tamaño, más débil es la intensidad de la fuente en curios y mayor tiempo de exposición se necesita (véase la Figura 7.7).

La intensidad de la radiación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente. Sin embargo, no es posible colocar el foco y el material tan cercanos como es necesario. Se comprobará que cuanto más corta es la distancia fuente-película, mayor es el paralaje o halo, efecto sobre la película radiográfica. Esto puede hacer borroso o desdibujar la imagen de una inclusión que debe estar en el material de prueba y así enmascarar un defecto. La distancia mínima a la película, según el tipo de fuente, tamaño de la mancha focal y espesor implicado, se determina mediante una fórmula normalizada para la falta de contraste geométrico:

$$Ug = \frac{Ft}{D}$$

donde:

Ug = falta de contraste geométrico

F = tamaño del foco en pulgadas (cm o mm)

D = distancia de la fuente al objeto que se está radiografiando en pulgadas (cm o mm)

t = espesor de soldadura u objeto que está siendo radiografiado en pulgadas (cm o mm)

Máxima tensión (kV punta)	Pantallas	Aplicaciones y límites aproximados de espesor práctico
50	Ninguna	Secciones metálicas extremadamente delgadas. Madera, plásticos, especímenes biológicos, etc.
150	Ninguna o lámina de plomo	Aleaciones ligeras, 5″ (127 mm). Aluminio o equivalente; 1″ (25,4 mm) acero o equivalente
	Fluorescente	1 $^1/_2$″ (38 mm) acero o equivalente
250	Lámina de plomo	2″ (50,8 mm) acero o equivalente
	Fluorescente	3″ (76,2 mm) acero o equivalente
400	Lámina de plomo	3″ (76,2 mm) acero o equivalente
	Fluorescente	5″ (101,6 mm) acero o equivalente
1.000	Lámina de plomo	5″ (127 mm) acero o equivalente
	Fluorescente	8″ (203,2 mm) acero o equivalente
2.000	Lámina de plomo	8″ (203,2 mm) acero o equivalente
15-24	Lámina de plomo	16″ (406 mm) acero o equivalente
MeV*	Fluorescente	20″ (508 mm) acero o equivalente

* Millones de electronvoltios.

(*a*)

Material	Vida media	Millones de electron-voltios de rayos	Espesor de la aplicación de acero en pulgadas
Cobalto 60	5,3 años	1,17-1,33	1,5-5
Cesio 137	33 años	0,66	1,0-4
Iridio 192	70 días	0,137-0,651	0,5-2,5

(*b*)

Figura 7.7. (*a*) Máquinas típicas de rayos X utilizadas en radiografías para comprobar defectos metálicos. (*b*) Fuentes radiactivas de rayos gamma utilizadas en radiografías para detectar defectos de material.

Generalmente la falta de contraste geométrico no será mayor que 0,020″ (0,5 mm) para un material con espesor inferior a 2″ (50,8 mm); no mayor de 0,03″ (0,76 mm) para material con espesor entre 2″ y 4″ (50 a 101 mm); y no más de 0,05″ (1,27 mm) para material con espesor mayor de 4″ (101 mm). Se requiere un operario de radiografías experto y cualificado para demostrar la capacidad de cumplir estos requisitos.

El tiempo de exposición para una radiografía debe ser suficiente para cumplir con las normas de densidad de película, que es una medida del efecto de oscurecimiento sobre la película expuesta. Las radiografías que están con demasiada luz pueden no revelar defectos como inclusiones, y aquellas que son demasiado oscuras

pueden hacer imposible separar los defectos del fondo. Los requisitos de densidad según la Sección V del código ASME estipulan que «la densidad de la película transmitida a través de la imagen radiográfica del cuerpo del penetrámeto adecuado y la zona de interés» serán:

— 1,8 para película sencilla visionando película de rayos X.
— 2,0 para radiografías de fuente de rayos Gamma.
— 2,6 para exposiciones de película doble.
— 4,0 para densidad máxima permitida para visionado simple o compuesto.

En las zonas soldadas que van a ser radiografiadas, las superficies deben estar pulidas de modo que se eliminen las irregularidades superficiales que pudieran interferir con una interpretación adecuada de la película.

En todo trabajo radiográfico existe un riesgo para la salud para todo el personal que esté en la zona de trabajo, a no ser que se sigan y cumplan las reglas de seguridad. Éstas comprenden tanto reglamentaciones de cuerpos legales gubernamentales como las de seguridad para los oficiales de radiación de planta. Las normas de seguridad generalmente especifican el uso de dispositivos de monitorización para la detección de radiaciones, la necesidad de acordonar el área o zona de trabajo y la situación de señales de alarma, el establecimiento de límites para dosis de radiación y el registro de dosis recibidas por los trabajadores y las acciones a tomar cuando estos límites son violados.

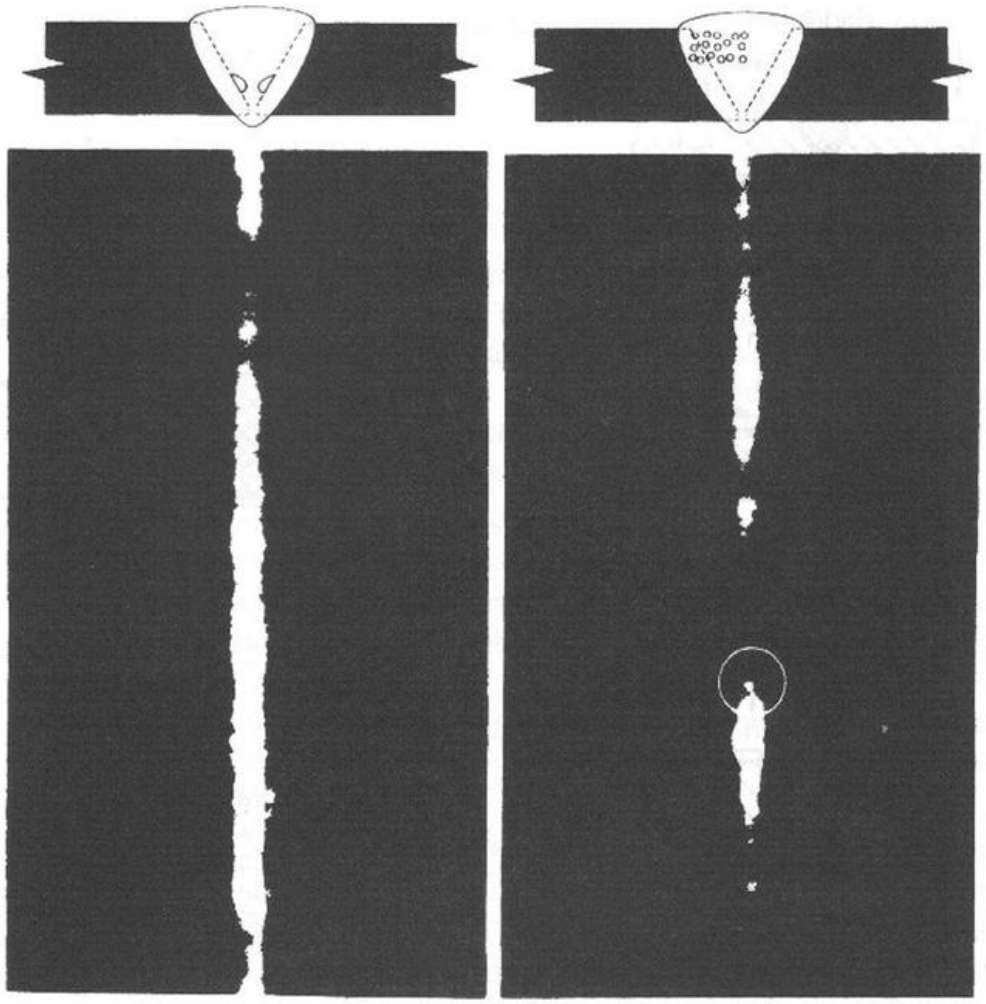
La inspección radiográfica exige una interpretación de las radiografías sobre película. Véase la Figura 7.8.

Los defectos tales como grietas, inclusiones de escoria, falta de penetración, vacíos y otros aparecen como zonas oscurecidas en la película ya que tienen menor densidad que el metal macizo. Las faltas típicas a resaltar son las siguientes: grietas que aparecen como líneas irregulares oscuras, inclusiones de escoria que se muestran como pequeños puntitos o motas oscuras con líneas externas irregulares, bolsas de gas que aparecen como motas oscuras con líneas externas suaves con arañazos o fallos ocasionales y la falta de penetración que se evidencia por una suave línea oscura a menudo localizada en medio de una soldadura.

El Código proporciona guías o normas para juzgar cuándo una indicación es aceptable. Algunas de las normas o requisitos son los siguientes:

1. El primer requisito es la inspección visual de la soldadura. Las uniones deben tener penetración total de la junta y deben estar libres de cortes internos, solapes o picos y valles abruptos. Está especificado que el refuerzo de soldadura no exceda de lo siguiente:

Espesor de chapa	Máximo espesor del refuerzo
Hasta 1/2″ (12,8 mm) inclusive	1/16″ (1,59 mm)
Más de 1/2″ a 1″ (25,4 mm) inclusive	3/32″ (2,38 mm)
Más de 1″ a 2″ (50,8 mm) inclusive	1/8″ (3,175 mm)
Más de 2″ inclusive	5/16″ (7,94 mm)



(*a*) (*b*)

Figura 7.8. Se requiere experiencia en la interpretación de películas radiográficas para estudiar las formas típicas de los defectos. (*a*) Falta de fusión de la pared lateral. (*b*) Porosidad agrupada. (*Cortesía de E. I. du Pont de Nemours & Co. Inc.*)

2. Las juntas soldadas para ser radiografiadas deben estar libres de arrugas o irregularidades superficiales de soldadura hasta el punto de que el contraste radiográfico resultante debido a algunas irregularidades no oculte o induzca a confusión en las imágenes de un defecto cuestionable.
3. Deben usarse unos patrones denominados penetrámetros para cada exposición de una película. El penetrámetro sirve como patrón de referencia y comparación sobre la película para comparar la magnitud de los defectos de la soldadura. Esto se realiza mediante una pequeña tira o banda de metal para cada exposición y taladrando orificios en la tira antes de la exposición; estas cintas metálicas sirven como guía para detectar defectos existentes dentro del 2 por 100 del espesor de chapa que está siendo soldada. Estos orificios se taladran con un calibre especificado de diámetro mínimo de 1/16″ (1,58 mm). El método apropiado de colocación del penetrámetro se muestra en la Figura 7.9 de la página siguiente.

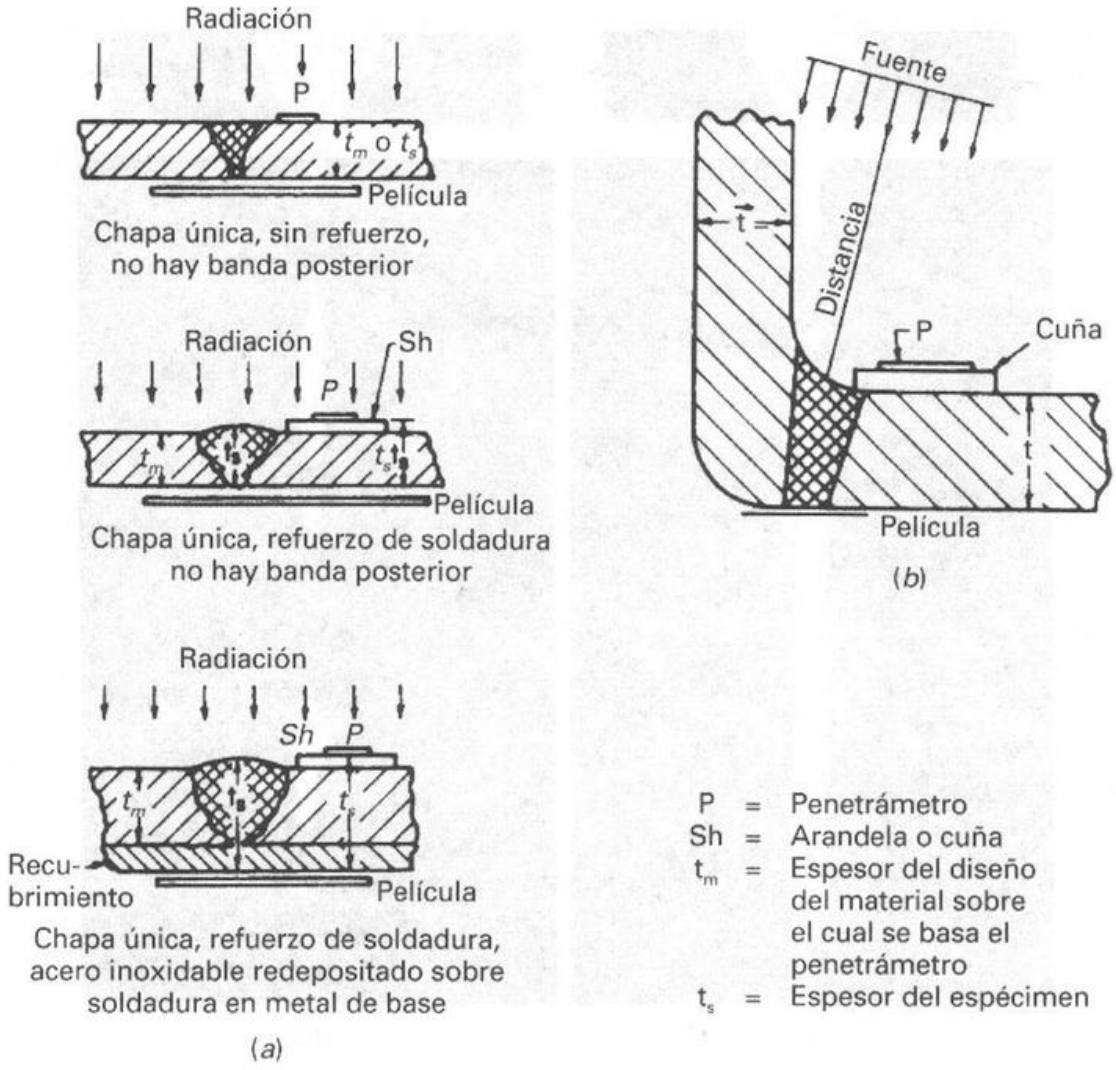


Figura 7.9. Penetrámetro y situación de la arandela o cuña en radiografía. (*a*) Para soldaduras a tope. (*b*) Para soldaduras tubulares.

Cuando se toma una radiografía de rayos X, el penetrámetro viene incluido en la misma y los orificios sirven como escala para detectar la magnitud de las faltas que la película recoge. Para comparar los orificios de un penetrámetro (chapita taladrada) con los orificios notados en una soldadura cuando la película se ha revelado, se ha incluido un patrón de comparación en cada película (chapita o fotografía de la misma). El Código estipula tolerancias para rechazar soldaduras basadas en los datos del penetrámetro.

Las calderas de potencia construidas según la Sección I del Código exigen que se radiografíen las piezas de caldera siguientes:

Fundiciones de acero (acero moldeado)

1. Si se va a utilizar un 100 por 100 de factor de calidad en las tensiones admisibles según las tablas del Código, todas las secciones críticas del acero moldeado, como pasos, compuertas, recrecimientos y cambios bruscos de sección con espesor de 4,5″ (114 mm) o menos, deben ser radiografiados.

2. La fundición de acero que tenga un cuerpo mayor de 4,5″ (114 mm) de espesor, exige que todas las partes o piezas de la fundición sean examinadas radiográficamente.

Juntas soldadas

1. Las juntas soldadas longitudinalmente requieren examen radiográfico en toda su longitud para las virolas o calderines de las calderas de potencia.
2. Las juntas soldadas circunferenciales de virolas o calderines requieren examen radiográfico si el espesor de la chapa excede de $1^1/_8$″ (28,6 mm).
3. Para tubos, tubuladuras y colectores, las juntas soldadas circunferenciales exigen examen radiográfico cuando:
   a) Si contienen vapor, en tubos de más de 16″ (406 mm) de diámetro nominal o espesores mayores de $1^5/_8$″ (41,3 mm). Para los que contienen agua, más de 10″ (254 mm) de diámetro nominal o más de $1^1/_8$″ (28,6 mm) de espesor. En ambos casos no existe contacto con los gases del hogar.
   b) Si están en contacto con los gases del hogar, pero no con la radiación del mismo, más de 6″ (152,4 mm) de diámetro nominal de tubo o más de 3/4″ (14 mm) de espesor.
   c) Si están en contacto con los gases del hogar y su radiación, más de 4″ (101,6 mm) de diámetro nominal del tubo o más de 1/2″ (12,7 mm) de espesor de pared.

Si los tubos tienen al menos cinco o más pasos o filas entre ellos y el hogar y si los tubos están en contacto con los gases del hogar que no excedan de 850 °F (454,5 °C), no se requiere radiografía de la soldadura.

Las indicaciones que mostradas sobre la radiografía son consideradas inaceptables por normativa comprenden:

1. Indicaciones de una grieta y zonas de fusión o penetración incompeta.
2. Otras indicaciones alargadas que tengan longitudes mayores de las mostradas en la tabla siguiente:

Espesor de soldadura	Máxima longitud de la indicación (indicio)
Hasta 3/4″ (19 mm)	1/4″ (6,35 mm)
De 3/4″ a $2^1/_4$″ (57,2 mm)	1/3 del espesor de soldadura
Más de $2^1/_4$″ (57,2 mm)	3/4″ (19 mm)

3. Los indicios alineados no pueden tener una longitud agregada mayor del espesor de la soldadura en una longitud total de doce veces el espesor de la soldadura.
4. Los cuadros de porosidad de la Sección I se utilizan para comprobar si algún grupo de indicios alineados puede no ser aceptable.

La Sección I ahora exige que el personal que realiza pruebas NDT para un fabricante o contratista debe estar cualificado para la práctica recomendada SNT-1C-1A de la sociedad americana de pruebas no destructivas.

El Código exige de los aceros fundidos que tengan reparaciones que excedan 1″ o el 20 por 100 del espesor de la sección, que pasen el examen radiográfico para estar seguros de que dicha reparación es satisfactoria. Como puede verse la técnica NDT se aplica a las reparaciones y no sólo a construcciones nuevas.

Pruebas y ensayos de partículas magnéticas. Estas pruebas se usan para detectar fallos superficiales por medio del establecimiento de un campo magnético o líneas de fuerza magnética, entre dos electrodos. Se rocía con un polvo magnético sobre el trabajo de prueba. El campo magnético afectará al polvo magnético y estas partículas se alinearán sobre un fallo, como se ve en la Figura 7.10. Pero la interpretación correcta de las concentraciones de polvo magnético requiere experiencia y práctica. La inspección por partículas magnéticas es un medio practico de señalar discontinui-

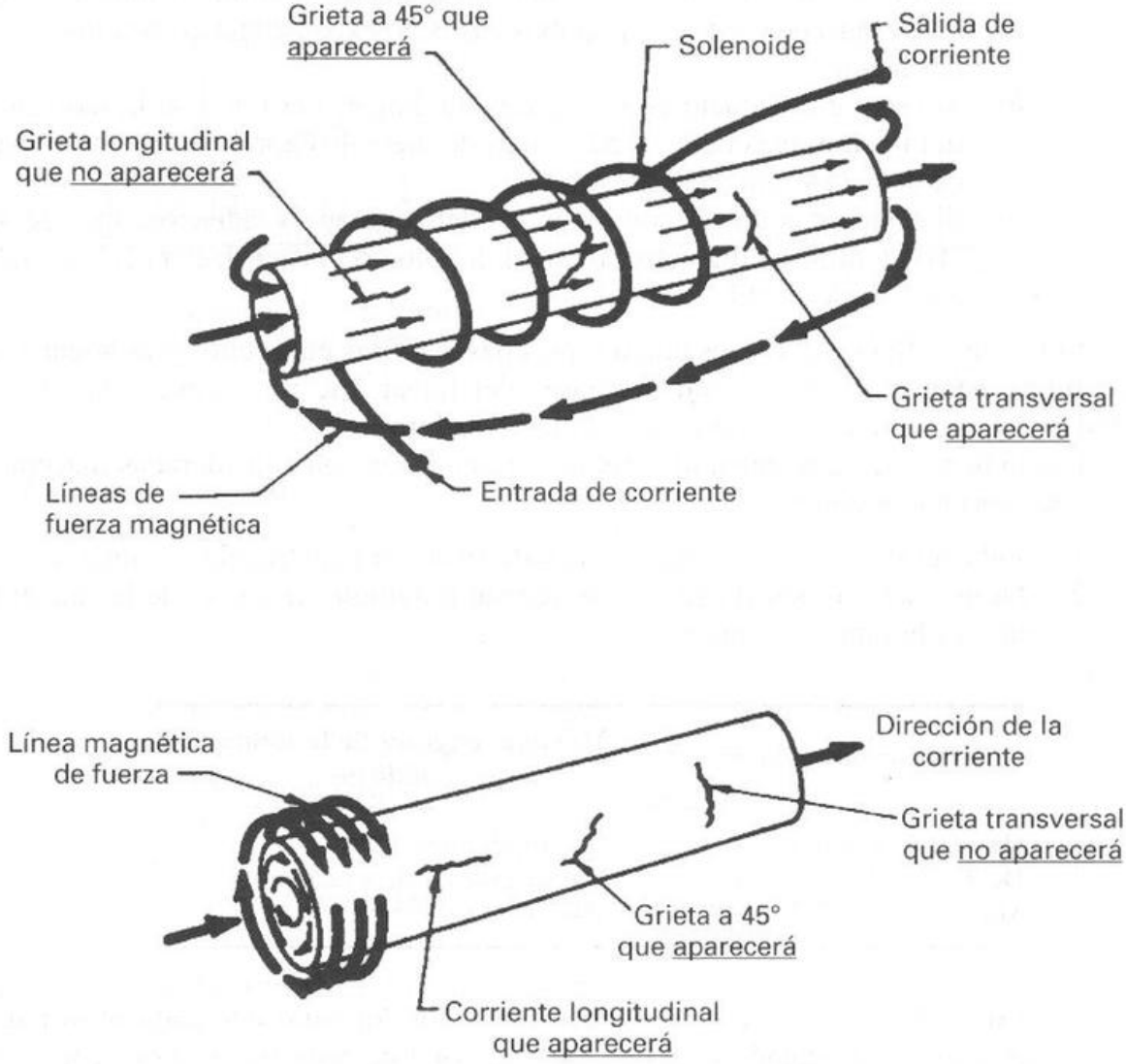


Figura 7.10. Inspección de partículas magnéticas. Las discontinuidades en material magnetizado desarrollan campos de fuerzas magnéticas localizadas. (*Cortesía de Power magazine.*)

dades de labio cerca de la superficie de una pieza. Tanto el método seco como el húmedo estan disponibles en la actualidad.

Las discontinuidades en un material magnetizado hacen aflorar campos de fugas localizados. Y estos campos atraen a las partículas finamente divididas. Este último punto señala el defecto y marca su extensión sobre la superficie de la pieza sometida a inspección.

Ambos tipos de corriente, continua y alterna, se utilizan para magnetizar. La corriente continua (cc) es útil para encontrar discontinuades bajo la superficie y se utiliza normalmente para inspeccionar soldaduras y fundiciones. La corriente alterna (ca) se emplea normalmente cuando se comprueban piezas mecanizadas de gran precisión y acabado fino.

Generalmente se considera la *magnetización de corriente continua* cuando se buscan defectos y roturas bajo la superficie. Con la corriente continua el campo magnético se extiende por el interior de la pieza, y los campos de fugas magnéticas se producen en la superficie por interrupción del camino magnético debajo de la superficie.

La *corriente continua de media onda* es un suministro práctico para defectos subsuperficiales, especialmente cuando la superficie exterior es basta como en las fundiciones o soldaduras. La corriente rectificada de media onda proviene de una fuente de corriente monofásica de alta intensidad y baja tensión. La mayoría de los fabricantes de equipo industrial pesado utilizan estas pruebas para comprobar grietas o roturas en soldaduras y fundiciones. Las soldaduras pesadas de gran espesor pueden inspeccionarse varias veces durante la elaboración de la soldadura y después de cada pasada, si se desea.

Los polvos magnéticos secos se usan para los tipos más ligeros de inspección. Los polvos rojos, grises o negros dan el contraste necesario de color de la pieza que se está comprobando. Los polvos secos permiten una sensibilidad máxima para defectos profundos y grietas para la superficie.

La *técnica del método húmedo* usa una pasta mezcla de partículas magnéticas combinadas con aceite o agua. La pieza a inspeccionar bien se sumerge en la mezcla o bien la mezcla se extiende sobre la pieza. En el método seco, que es más sensible a defectos bajo la superficie, el polvo magnético se extiende por soplo sobre la pieza a inspeccionar.

Para muchas aplicaciones, las partículas magnéticas son recubiertas con un material *fluorescente* y se usan en combinación con luz negra. Así, la indicación resultante reluce y es atractiva para el ojo. En efecto, esto incrementa la sensibilidad de la inspección.

La principal limitación del método de las partículas magnéticas es que se aplica sólo a materiales magnéticos y no es adecuado para unos defectos muy pequeños o situados muy profundamente. Cuanto más profundo está el defecto debajo de la superficie, más grande aparecerá. Los defectos superficiales son más fáciles de hallar cuando tienen una forma agrietada, como la de la falta de fusión en la soldadura. En objetos grandes y pesados, cuando se desea una inspección extremadamente sensible, la operación lleva más tiempo. Esto es cierto con piezas de tamaño medio crítico como hélices de aviones. Con las pruebas de partículas magnéticas, la superficie a inspeccionar debe estar disponible para el operario. Esto significa que los ejes u otros equipos no pueden inspeccionarse sin desmontar ruedas, poleas o alojamientos de cojinetes.

Las ventajas del ensayo de partículas magnéticas son muchas. La prueba de partículas magnéticas puede usarse sobre materiales de tipo magnético que son muy corrientes en productos industriales. Es un método positivo de encontrar todas las grietas superficiales. Y como estas grietas en las superficies son las más serias y pueden conducir a la rotura, es importante. El sistema es flexible y permite el uso efectivo de equipo portátil. El coste de equipo y horas de trabajo requeridas para la prueba resulta favorable en comparación con el método de inspección visual simple.

Inspección de líquidos (tintes) penetrantes. Este método de prueba se utiliza de modo algo parecido a las pruebas de partículas magnéticas, excepto que se usa principalmente sobre materiales no magnéticos. Pero puede utilizase sobre material magnético. El tinte penetrante contiene un tinte visible, normalmente rojo. Las indicaciones de los defectos aparecen como líneas rojas o puntos contra el fondo blanco del revelador. Es principalmente un indicador de defectos superficiales y se utiliza como sigue: se aplica un tinte penetrante a la pieza en baño o inmersión, con brocha o espray y se le deja situarse durante algún tiempo. Después del tiempo apropiado de penetración, el exceso de líquido penetrante se elimina de la superficie y se aplica un revelador. El líquido penetrante queda atrapado en el defecto y se lleva a la superficie por la acción del revelador (véase la Figura 7.11). Las grietas se detectan al notarse el contraste entre el color blanco del revelador y el rojo del líquido penetrante.

Otro sistema de penetración utilizado es el método fluorescente penetrante que contiene un material que es fluorescente y brilla bajo una luz negra. Las indicaciones de los defectos aparecen como líneas fluorescentes o puntos contra el fondo no fluorescente.

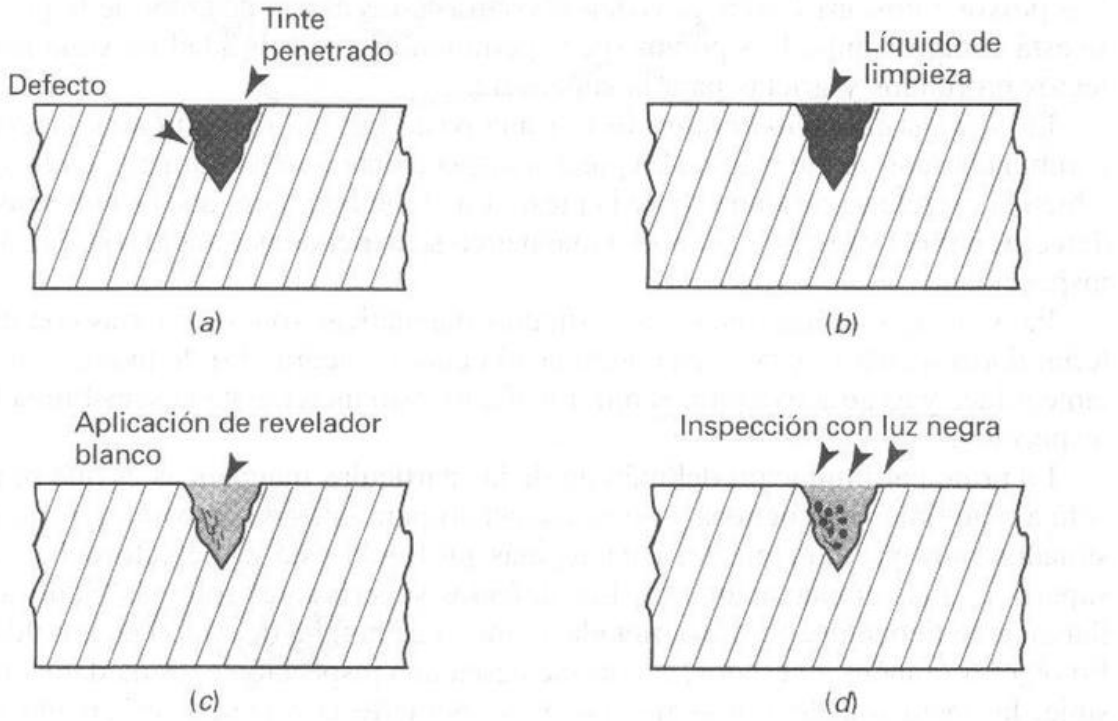


Figura 7.11. La inspección por líquido penetrante implica cuatro pasos para revelar un defecto: (*a*) se aplica un tinte rojo y se le permite penetrar en un defecto sospechado; (*b*) el exceso de tinte se elimina de la superficie; (*c*) se aplica un revelador blanco; (*d*) la inspección con luz negra muestra en rojo la situación del defecto.

Las ventajas del método de tinte penetrante son las siguientes: es de suministro rápido en el sistema de inspección de puntos durante una parada menor por períodos de cierre; el coste inicial de la prueba es relativamente bajo. Una superficie perfectamente blanca o tipo sábana indica que hay ausencia de grietas u otros defectos que estén abiertos a la superficie. Las desventajas son que no es práctico sobre superficies muy bastas o rugosas y que el color de contraste es limitado sobre algunas superficies. También que sólo detecta defectos abiertos a la superficie.

Inspecciones ultrasónicas. Las pruebas ultrasónicas hacen uso de ondas sónicas de alta frecuencia de 0,5 a 10,0 MHz para inspección del material en busca de grietas o defectos y para medir el espesor de chapa o pared. El principio básico utilizado en un sistema de ultrasonidos es la transformación de un impulso eléctrico en vibraciones mecánicas y después la retransformación de las vibraciones mecánicas en impulsos eléctricos que puedan verse o mostrarse en una pantalla denominada pantalla de tubo de rayos catódicos (CRT). La transferencia de energía mecánica a eléctrica se hace por medio de un transductor. Un transductor es un dispositivo que transforma energía de una forma a otra. Los transductores ultrasónicos transforman energía eléctrica de alta frecuencia en energía mecánica de alta frecuencia a través de elementos magneto-restrictivos hasta 100 kHz, y por encima de este rango suelen ser normalmente del tipo piezo-eléctrico. En el campo NDT ultrasónico, los transductores piezo-eléctricos se utilizan mucho. Los transductores piezo-eléctricos dependen de la dilatación o expansión y contracción de ciertos materiales cerámicos y cristalinos bajo el influjo de un campo potencial eléctrico fluctuante (oscilante). Si se aplica presión mecánica a ciertas capas de cristales específicos, se genera un potencial eléctrico a través de ellos que es proporcional a la presión aplicada; e inversamente un potencial eléctrico de frecuencia apropiado producirá una vibración del cristal y eso genera ondas de presión en un medio con el que está en contacto íntimo. La Figura 7.12 de la página siguiente muestra una disposición de una probeta en la que el cristal o transductores están montados para generar energía mecánica longitudinal (sonido) o angular en una pieza de prueba.

El componente básico de un típico impulso de detección de defectos es un impulso eléctrico corto generado y aplicado a los electrodos de la probeta, que convierte el impulso de eléctrico a energía de vibración mecánica. Este impulso ultrasónico viaja a través del material y una parte es reflejada a la probeta receptora mediante un reflector que puede ser la parte final del material sometido prueba por un defecto interno del mismo. El impulso que vuelve al receptor genera un pulso eléctrico que es amplificado y mostrado en la pantalla por un tubo de rayos catódicos (véase la Figura 14.19).

El tubo de rayos catódicos (CRT) es un componente familiar de un aparato de televisión. Se emplea en muchas aplicaciones para hacer visible cualquier onda que puede ser convertida en un chorro o haz de electrones. Para evaluar la información mostrada en la pantalla del tubo de rayos catódicos (CRT) debe seguirse una calibración técnica de modo que puedan compararse o captarse los defectos con relación a bloques de referencia externos. El objeto principal de estos bloques es:

1. Calibrar el instrumento para un tiempo base para ondas longitudinales o transversales.
2. Medir ciertas características de las probetas y del aparato.

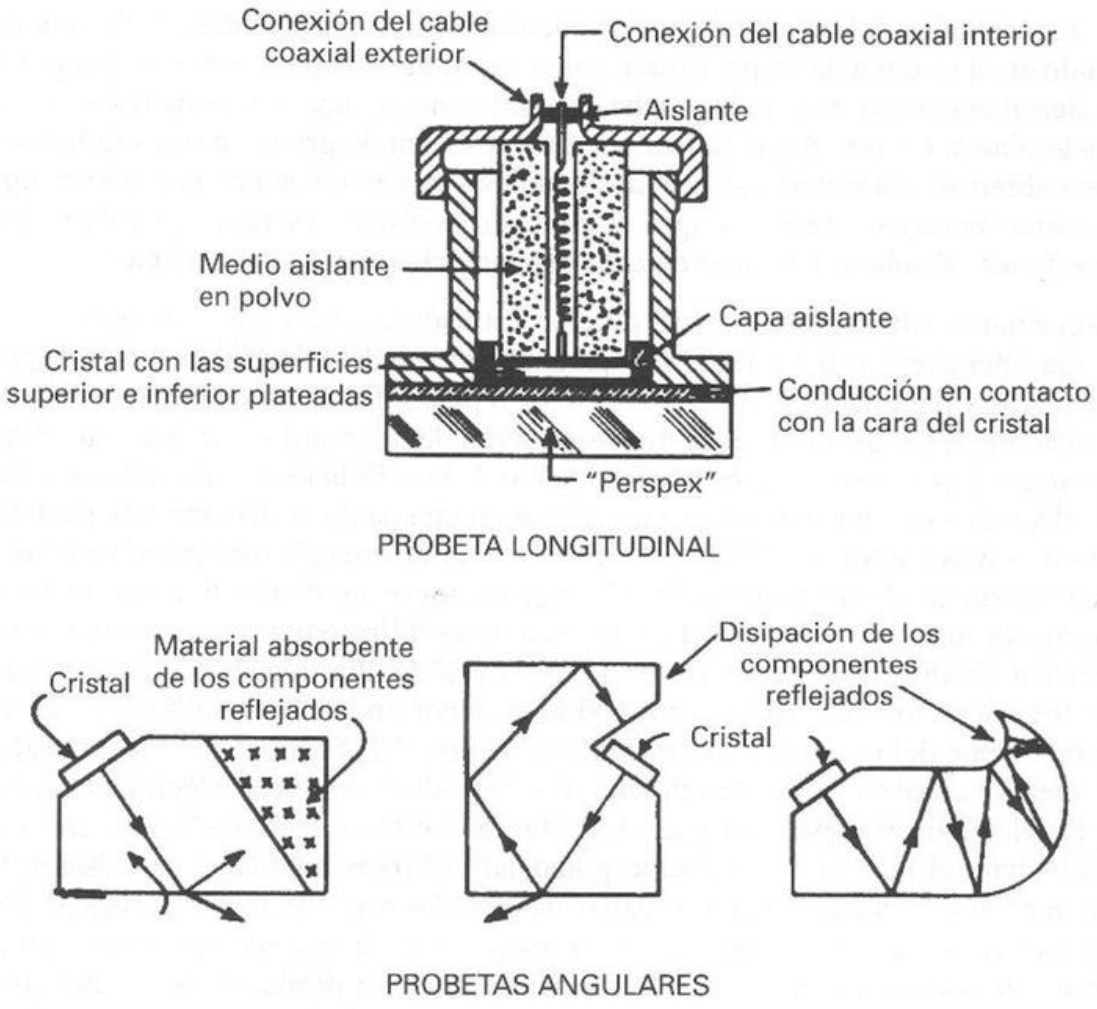


Figura 7.12. Detalles de probetas de cristal detectoras de ultrasonidos para sistemas de detección longitudinal y axial.

3. Ajustar la sensibilidad y comprobarla periódicamente para validarla y que permanezca constante a lo largo de una prueba.
4. Tener un procedimiento escrito de modo que los ajustes y calibrado puedan ser duplicados posteriormente.

Las pruebas ultrasónicas están agrupadas en tres categorías básicas: pruebas de impulso-eco, transmisión transversal y prueba de resonancia. El método del impulso y eco implica transmitir un impulso corto del sonido de alta frecuencia a través de la pieza que se está probando y después detectar unos ecos que se reciben de algún detalle constructivo como un agujero o defecto del material que implique separación o vacío de material suficientemente grande como para que el sonido no pueda transferirse a través de la interface. En operación, un pulso-eco unitario producirá, a través de un impulso eléctrico, un impulso corto de señal eléctrica de alta frecuencia. Ésta se transmite al transductor que es así forzado a vibrar, normalmente a su frecuencia de resonancia. La probeta debe acoplarse a la pieza a comprobar con aceite, agua, grasa o algún otro líquido. El tren de ondas sónicas viajará a través de la pieza a probar hasta encontrar alguna forma de discontinuidad o defecto. Esta interrupción del medio produce una reflexión de la onda sónica hasta el transduc-

tor-receptor. La energía de la vibración de la onda sonora obliga al transductor en movimiento a producir un impulso de eléctrico que se alimenta a un amplificador. La salida de este amplificador se recoge en un tubo de rayos catódicos que muestra las señales en una base de tiempo. Si se utiliza un amplificador lineal, la amplitud de los ecos de vuelta puede utilizarse como medida del área que produce la señal reflejada.

Las pruebas de resonancia hacen uso de un sistema ajustable de ondas continuo. Este método es empleado normalmente para medir pequeños espesores de paredes delgadas, hasta 2″ ó 3″ (de 50 a 75 mm). La resonancia del cristal se ajusta a la pieza sometida a prueba. En la práctica se oye un pitido agudo, incluso puede verse porque el circuito eléctrico está resultando eléctricamente. Con un calibrado adecuado pueden hacerse lecturas directas del espesor.

Los cristales se tallan para ondas longitudinales, superficiales o de cizalladura. Las ondas sónicas de alta frecuencia obedecen las mismas leyes físicas que las ondas luminosas y pueden ser reflejadas, refractadas, absorbidas y polarizadas. Usar un chorro o haz ultrasónico para escanear materiales acústicamente transparentes como el acero es análogo, utilizar un chorro de luz para escanear materiales transparentes como el agua o vidrio. Como la mayor parte de los equipos son portátiles, las pruebas ultrasónicas están bien adaptadas para aplicaciones de campo. Hay muchos instrumentos en el mercado que trabajan con batería y que son capaces de realizar muchas pruebas cualitativas.

Como con los métodos de prueba no destructivos, hay distintas ventajas e inconvenientes asociados con las pruebas ultrasónicas. Las ventajas de estas pruebas son:

1. Alta sensibilidad, permitiendo la detección de defectos minúsculos.
2. Energía penetrante, permitiendo la detección e inspección de secciones de gran espesor.
3. Precisión en la localización y medida del tamaño del defecto.
4. Rápida respuesta, permitiendo una inspección rápida.

Las desventajas de las pruebas ultrasónicas son que puedan estar limitadas por la geometría desfavorable de la pieza, como tamaño común, contorno, complejidad y orientación relativa del defecto; y la estructura del material, como el tamaño del grano, porosidad y contenido de inclusiones o precipitados finos dispersos.

Prueba de corrientes parásitas. El principio subyacente de las pruebas por corrientes vagabundas o parásitas es la medida de la impedancia del flujo electrónico en la pieza que está siendo probada. Las corrientes eléctricas débiles o corrientes parásitas son inducidas por una probeta que contiene bobinas inductoras y sensores. Cualquier cambio en la geometría de la pieza como un poro, grieta o adelgazamiento, afectará al flujo de las corrientes parásitas. Este cambio en el flujo de las corrientes parásitas será detectado por la bobina sensora en una banda, con una pantalla de tubo de rayos catódicos (CRT) o ambos. La precisión de la caracterización del defecto detectado depende de la calidad de la norma utilizada al calibrar el instrumento de corrientes parásitas. Una pieza de tubería de material idéntico al de los tubos que se van a inspeccionar deberá utilizarse para hacer el calibrado. La norma deberá tener un rango de defectos similar a los esperados en los tubos que se van a comprobar.

Los ensayos por corrientes parásitas puedan detectar tubos que no pierden pero que pueden verse deteriorados como resultado de un adelgazamiento o debilitamiento, erosión o desgaste. Por comprobación periódica de los tubos y manteniendo un registro preciso, los cambios de tubos pueden ser convenientemente programados por anticipado durante períodos de mantenimiento y reposiciones de toda la planta, y no en base a las roturas que ocurren durante los turnos de producción. Las inspecciones de corrientes parásitas a partir del diámetro exterior de los tubos de intercambiadores permiten la detección de picaduras externas-internas, reducción de espesor, grietas, vacíos, inclusiones, descinficación y carbonización. Estas condiciones pueden ser identificadas por probadores expertos y localizadas a lo largo de la pared de la tubería. La seriedad del defecto puede juzgarse a partir de los resultados por comparación con los defectos en un elemento normal (espécimen).

Emisión acústica. Cuando un material se dilata o estira, emite algún sonido, y colocando sensores sobre el material es posible captar estos sonidos. Se ha encontrado que los sonidos acústicos emitidos por la mayoría de los materiales están por encima del rango auditivo del oído humano estando generalmente por encima de 100 kHz. Esto hace posible su instrumentación para niveles de sonido por encima de la mayoría de las fuentes de ruidos espúreos que serán de frecuencias menores. Por ejemplo, si suponemos que existe el crecimiento de una pequeña grieta subcrítica en una sección de una pieza de acero de cierto espesor, a medida que la grieta se propaga hacia el exterior, los átomos se desplazan a una pequeña distancia en un tiempo muy corto. Este desplazamiento conduce a una onda transitoria de tensión elástica que viaja o se desplaza hacia fuera desde el área o extremidad de la grieta. Esta onda de tensión del material se denomina emisión acústica. Las extensiones o desgarros de las grietas muy grandes que se desplazan hacia la superficie pueden ser oídas. Sin embargo, colocando transductores sobre la superficie, puede detectarse la propagación de la grieta a medida que se desarrolla o progresa. Un sistema de emisión acústica monitorizado proporciona el medio de escanear de forma continua una pieza estructural cargada de los cambios en las emisiones acústicas en orden a detectar cualquier desarrollo de la grieta o defecto. Cuando una onda de tensión alcanza un transductor, se genera una señal eléctrica que puede presentarse para suministrar información acerca del elemento de emisión acústica. Detectando y procesando la información contenida en la emisión acústica de la onda de tensión, puede seguirse el crecimiento de la grieta y estudiarse en tiempo real cuando está ocurriendo. Los sistemas actuales incluyen adquisición de datos para evaluar la seguridad de las grietas. Estos datos son almacenados en un ordenador para un análisis real para referencia futura. Las emisiones acústicas tienen gran potencial en la monitorización continua de la presión crítica en recipientes para evitar la formación de grietas como las que existen en piezas o partes de energía nuclear, donde, a causa de los riesgos de radiación, el acceso para inspección puede estar restringido. Este método está todavía en etapa de desarrollo para aplicaciones semejantes.

Ensayos de pruebas y fugas. Éstos están considerados como pruebas NDT supuesto que los ensayos se mantienen dentro de los límites prescritos para evitar una deformación permanente. Una prueba hidrostática al 150 por 100 de la presión de

trabajo admisible se considera como no destructiva. Durante esta prueba se hacen inspecciones visuales de soldaduras, juntas y conexiones para detección de fugas, mientras se vigila la presión para ver cualquier bajada que podría indicar una fuga oculta.

Otras pruebas de fuga son las de emisión de burbujas, detección de fugas de halógenos (freones) y espectrómetros de masas.

Los exámenes no destructivos mientras una pieza de un equipo está todavía en servicio son un objetivo a desarrollar a largo plazo. Un desarrollo reciente se ha realizado para inspeccionar tubos de vapor a alta presión utilizando tomografía computerizada de rayos gamma que mide la transmisión de fotones. Cuando los fotones penetran en el material, algo de su energía transportada se convierte en luz a través de la excitación y ionización o por procesos de fluorescencia. La luz centra el efecto fotoeléctrico en un tubo fotomultiplicador (o efecto fotovoltáico en un dispositivo de estado sólido) que produce un impulso eléctrico medible proporcional a la energía de los fotones o rayos gamma incidentes. Un circuito discriminador detecta sólo aquellos rayos gamma que han sido transmitidos a través del objeto de ensayo, eliminando la detección de los fotones no deseados. Mediante la utilización del análisis por ordenador y programas especiales para la analítica del tubo catódico, se puede utilizar un mapa tridimensional para detectar grietas.

Habrá otros métodos de examen no destructivo desarrollados en este campo creciente rápidamente que trata de ayudar a nuestra habilidad y capacidad para inspeccionar por los limitados sistemas visuales.

Selección del método NDT. La amplia selección o abanico de métodos NDT requiere considerar la fortaleza y sensibilidad de cada método, y cuál puede ser el defecto que nos concierne. Frecuentemente habrá de ser utilizado más de un método NDT para hallar y evaluar discontinuidades. El examen e inspección NDT requiere una gran experiencia en el sistema a aplicar para detección de defectos. Esta experiencia especializada se detalla en SNT-TC-1A, «Práctica recomendada para cualificación y certificación del personal de técnicas no destructivas», publicada por la Sociedad Americana de Pruebas No Destructivas (ASNT). Son posibles tres niveles o grados de cualificación en cada uno de los métodos NDT previamente descritos. La persona de nivel 3 está más cualificada, lo que generalmente requiere no sólo conocimientos teóricos de los métodos NDT, sus ventajas, atajos y la interpretación de los resultados de las pruebas. Los códigos de calderas y recipientes a presión de ASME se refieren a la ASNT como fuente de detalles sobre cualificación y certificación de examinadores de técnicas NDT. El inspector del Código debe incluso estar seguro de que los procedimientos descritos pueden detectar las discontinuidades por el método NDT a utilizar que no son aceptables en la sección del Código según la cual se está construyendo la caldera o recipiente a presión. Por ejemplo, hay normas radiográficas en la Sección I que pueden diferir algo de las que implican a un recipiente a presión nuclear. El inspector «autorizado» que hace las inspecciones del Código revisará los resultados hallados por métodos NDT que están dentro de los límites permisibles por el Código. Una coordinación muy cercana es pues esencial entre el examinador NDT y el inspector autorizado.

SISTEMA DE CONTROL DE CALIDAD

Los detentadores del sello de ASME, como es la «S» de calderas de potencia, deben tener un sistema de control de calidad que demuestre que serán satisfechos todos los requisitos del Código sobre diseño, materiales, fabricación, examen NDT e inspección. El sistema de control de calidad por elementos debe estar por escrito, normalmente en forma de manual, pero con su utilización restringida para uso de gente ajena y sólo el inspector autorizado o persona que la ASME designe es quien revisará el proceso de detentadores del sello para merecerlo. El párrafo A-300 detalla los requisitos del control de calidad en la Sección I. Incluidos en lo descrito están: autoridad y responsabilidades para el control de calidad, carta de la organización mostrando cómo será llevado a cabo el control de calidad a través del taller del fabricante, cálculos y dibujos de diseño según el Código, procedimientos de control de materiales, métodos y procedimientos de inspección y examen de materiales, procedimiento de soldadura a seguir según el Código, exámenes no destructivos según el Código, tratamientos térmicos a aplicar, calibrado y procedimientos a seguir para tratar de equipos de medida y procedimientos de prueba de los equipos y registros a realizar y distribuir (informes de datos) y mantener según el Código.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

Soldadura

1. Cite algunos defectos dimensionales que puedan tener lugar en una junta soldada.

RESPUESTA: Los defectos dimensionales posibles en una junta soldada son:

1. Combado o torcedura de la chapa.
2. Preparación incorrecta de junta o desalineado de la misma.
3. Tamaño incorrecto de soldadura para el espesor de chapa a soldar.
4. Perfil incorrecto de soldadura tal como solape, exceso de convexidad y exceso del refuerzo de soldadura.
5. Dimensiones finales incorrectas.

2. Cite algunas discontinuidades estructurales típicas que puedan encontrarse en una junta soldada.

RESPUESTA: Las discontinuidades estructurales que pueden encontrarse en juntas soldadas son:

1. Porosidad.
2. Inclusión de escoria.
3. Inclusión de tungsteno.
4. Fusión incompleta.
5. Cortes interiores.
6. Grietas.
7. Irregularidades superficiales.

3. *a*) ¿Qué es soldadura eléctrica de arco?
b) ¿Cuáles son los metales padre o base?

RESPUESTA:

a) Soldar dos piezas o partes de acero juntas, con la fusión llevada a cabo por calentamiento del metal por el arco eléctrico.
b) Los metales que se van a soldar.

4. ¿Cuál debería ser el estado o condición de los metales base en el momento de la soldadura?

RESPUESTA: Los metales deberán estar limpios y libres de grasa, suciedad, polvo, pintura u otras sustancias extrañas excepto una fina capa de aceite de limpieza o protección, si así está especificado.

5. ¿Qué precauciones deben tomarse por el soldador mientras suelda o por el inspector de soldadura mientras vigila el proceso de soldadura?

RESPUESTA: La cara y la nariz del soldador o inspector deberían estar cubiertas por una celada o salvacara. El vidrio de la careta debe estar oscurecido para proteger los ojos. El soldador también deberá llevar guantes para proteger las manos.

6. ¿Qué es mejor: el arco largo o corto?

RESPUESTA: El arco corto, porque hace una soldadura más pura, da mejor fusión y penetración y causa menos escorias en el metal fundido.

7. ¿Cómo debería ser retirada una soldadura condenada o en mal estado para permitir a la junta volver a ser soldada?

RESPUESTA: El material debería picarse o amolarse (con muela) para que aflore el metal bueno antes de rehacer la soldadura.

8. ¿Qué se entiende por los términos «mano adelantada» y «mano trasera» cuando se aplican a soldadura oxiacetilénica?

RESPUESTA: En la soldadura a mano adelantada, la llama de soldar se apunta en la dirección en la que progresa la soldadura. En la soldadura a mano trasera, la llama apunta a la dirección opuesta a la que se hace la soldadura.

9. ¿Qué se entiende por soldadura a tope doble y a tope simple?

RESPUESTA: En la soldadura a tope doble, el metal se deposita en el surco o garganta por ambos lados de la chapa, mientras que a tope simple, el metal se deposita desde un solo lado con las chapas a soldar juntas a tope en vez de solapadas una sobre la otra.

10. Después de que el primer lado de una soldadura a tope doble se ha realizado, ¿qué deberá hacerse en la junta antes de que sea soldado el segundo lado?

RESPUESTA: El segundo lado debe ser limpiado con amoladora para asegurar una superficie limpia de forma adecuada para que el segundo lado se suelde y se asegure una buena fusión del metal y agarre del mismo en este lado.

11. ¿Qué se entiende por refuerzo de una soldadura?

RESPUESTA: La cantidad de soldadura por encima de la superficie de la chapa en el lado de cara. Esto asegura una penetración total para todo el espesor de las chapas a unir.

12. ¿Por qué es una práctica común utilizar electrodos revestidos en la soldadura metálica de arco?

RESPUESTA: El revestimiento pone un escudo entre el arco y la atmósfera y produce una escoria que cubre la soldadura, lo que da al metal de la soldadura buena resistencia y ductilidad.

13. ¿Está permitida la soldadura a tope simple en la fabricación de calderines soldados para calderas?

RESPUESTA: No, a no ser que se utilice una banda o pletina trasera. Si se utiliza pletina trasera para asegurar la total penetración del metal soldado, la soldadura debe hacerse solamente desde un lado.

14. *a*) ¿Cuál es la elongación mínima aceptable al aplicar una prueba de flexión o doblado libre?
b) ¿Cuántas series de chapas de prueba se exigen en una prueba de soldadores?
c) ¿Cada cuánto tiempo son requeridos los soldadores para hacer las pruebas de cualificación?

RESPUESTA:

a) El elemento será flexionado o doblado en frío hasta que la elongación o alargamiento mínimo medido en toda la soldadura y sobre sus fibras exteriores sea del 30 por 100 ó 700.0000 dividido por la tensión de rotura, U, más el 20 por 100, la que sea menor. Aquí, U representa la resistencia mínima última especificada del material a soldar, en libras por pulgada cuadrada, según las tablas del código de tensiones.
b) Dos series, una prueba de flexión de cara y otra de flexión de la raíz, por cada espesor de material, posición y proceso de soldadura a utilizar. Véase la Sección IX del código ASME.
c) Cuando un soldador no ha usado el proceso específico de soldadura como el proceso de arco, arco sumergido, etc., para soldar materiales ferrosos o no ferrosos por un período de seis meses o más, o cuando hay una razón específica para cuestionar la capacidad o habilidad del soldador para realizar soldaduras que cumplan las especificaciones.

15. ¿Qué soldaduras bajo las normas de la Sección I requieren examen radiográfico?

RESPUESTA: En calderas de potencia, las siguientes:

1. Para fundiciones de acero, si se va a aplicar un factor de calidad del 100 por 100, todas las secciones críticas bruscas de más de 4,5″ (114 mm) de espesor. Para fundiciones de acero de más de 4,5″ (114 mm) de espesor, todas las piezas de fundición de acero.
2. Para juntas soldadas longitudinales de virolas o calderines, toda la longitud de soldadura.
3. Para juntas circunferenciales soldadas de virolas o calderines, para espesores de chapa superiores a 1,5″.
4. Para soldaduras circunferenciales en tubos, tubuladuras o colectores:

   a) Si contienen vapor y no están en contacto directo con los gases del hogar, para los de más de 16″ (406 mm) de diámetro de tubo o más de $1^5/_8$″ de espesor (41,3 mm). Si contienen agua, 10″ (254 mm) de diámetro nominal del tubo o más de $1\ ^1/_8$″ (28,6 mm) de espesor.

b) Si están en contacto con los gases del horno, pero no en contacto con la radiación del hogar, más de 6″ (152,4 mm) de diámetro nominal del tubo o más de 3/4″ (19 mm) de espesor.
c) Si están en contacto con los gases y también con la radiación del hogar, más de 4″ (102 mm) de diámetro nominal o más de 1/2″ (12,7 mm) de espesor.
d) Los tubos con más de cinco filas por detrás del hogar están excluidos como tubos que no están en el camino de paso de gases que no superen 850 °F (454,4 °C).

16. ¿Qué son tensiones residuales en soldadura? ¿Qué las produce?

RESPUESTA: Las tensiones residuales son aquellas tensiones internas remanentes en el metal soldado y material de base adyacente cuando una soldadura se ha realizado. Están producidas porque el metal de la soldadura y el material de base están por necesidad a temperaturas considerablemente diferentes cuando se realiza la soldadura y además no dilatan y contraen uniformemente, así que son asiento de tensiones internas debido a los efectos en la HAZ.

17. ¿Qué se entiende por disminución o desaparición de las tensiones residuales y cómo se puede conseguir?

RESPUESTA: La disminución de tensiones o tratamiento térmico post-soldadura es el calentamiento uniforme de una estructura o parte de ella (soldadas conjuntamente) a una temperatura justamente por debajo del rango crítico del metal. El objeto de la disminución o extinción de tensiones es descargar la mayor parte de las tensiones residuales que puedan existir en una junta soldada como consecuencia de los efectos térmicos del calor de la soldadura.

El Código especifica temperaturas de precalentamiento para los diferentes tipos de números P de metales que pueden soldarse. Generalmennte la temperatura de precalentamiento está por debajo de 450 °F (232,2 °C). Las temperaturas de tratamiento térmico post-soldadura a aplicar a los diferentes tipos de metales están también especificadas en el Código por grupos de números P. Para aceros al carbono planos, ésta es generalmente de 1.100 °F (593 °C) a mantener una hora por pulgada de espesor de chapa.

18. ¿Qué es un proceso de soldadura «aprobado» o «calificado»?

RESPUESTA: Uno que ha sido descrito en detalle por escrito y seguido por la elaboración de las pruebas de chapa como se exige por el código ASME, cuando dichas pruebas de chapa han sido sometidas a pruebas especificadas en el Código y comprobado que cumplen los requisitos del mismo para la clase de trabajo a realizar. Esto incluye considerar el material (números P), espesor, proceso de soldadura, electrodos, posición del soldador y tratamiento térmico a aplicar.

19. ¿Qué significan los términos falta de fusión, falta de penetración e inclusiones de escoria? ¿Cómo se producen y cuáles deberían ser las condiciones para remediarlas?

RESPUESTA: Falta de fusión es la falta de fusión conjunta entre el metal base y el metal que está siendo depositado. Está causada por técnicas incorrectas de soldadura entre las cuales puede estar que el calor aplicado sea demasiado bajo a causa de una baja intensidad de corriente (amperaje), soldadura demasiado rápida (y movimiento), inadecuada preparación superficial y causas similares. Cuando se nota o descubre la falta de fusión, es necesario pasar la muela rotativa para sacar toda la soldadura y volver a soldar hasta conseguir la fusión del metal aportado con el metal base.

Falta de penetración significa que la soldadura o fusión de las chapas no se ha realizado en todo el espesor de la chapa, dejando parte de éstas sin unir. Está causada por una incorrecta preparación de la junta, una técnica pobre de soldadura o una preparación incorrecta de las superficies. Se corrige por amolado y limpieza hasta el metal base sano y relleno de toda zona con una soldadura de buena penetración según los requisitos del Código.

Inclusiones de escoria significa que hay material extraño en la soldadura, que puede debilitar la unión. Está producido generalmente por mala penetración de la junta por falta de limpieza al soldarla. Para corregirla, la zona afectada se sanea con la muela rotatoria y se vuelve a soldar según los requisitos del Código.

20. ¿Qué es una banda posterior cuando se habla de soldadura? ¿Cuando una junta se suelda por un lado solamente, puede considerarse equivalente a una unión doble a tope?

RESPUESTA: Es una banda metálica normalmente del mismo material que el que está siendo soldado, de 1″ (25 mm) a 3″ (76 mm) de ancho y de 1/8″ (3 mm) a 1/4″ (6 mm) de espesor, colocada en la cara exterior de la junta o unión a soldar y capaz de posibilitar al soldador la penetración de toda soldadura a través del espesor completo de la chapa o tubo y evitar el goteo del material fundido. La soldadura por un solo lado puede considerarse una doble junta cuando se alcanza penetración completa y refuerzo en ambos bordes mediante el uso de una banda posterior o anillo de enfriamiento.

21. ¿Cuál es la máxima desviación permisible de los bordes a tope de las uniones soldadas en cualquier punto y en juntas cinchadas?

RESPUESTA:

Espesor de chapa, T	Máxima desviación permitida	
	Longitudinal	Circunferencial
Hasta 1/2″ (12,7 mm) inclusive.	1/4 T	1/4 T
Más de 1/2″ (12,7 mm) hasta 3/4″ (19 mm) inclusive.	1/8″ (3,2 mm)	1/4 T
Más de 3/4″ (19 mm) hasta 11/2″ (38 mm) inclusive.	1/8″ (3,2 mm)	3/16″ (4,76 mm)
Más de 1 1/2″ (38 mm) hasta 2″ (50 mm) inclusive.	1/8″ (3,2 mm)	1/8 T
Más de 2″ (50 mm).	Menos de 1/16 T o 3/8″ (4,8 mm)	Menos de 1/8 T o 3/4″ (19 mm)

22. ¿Qué preparativos han de efectuarse antes de la unión por soldadura tope de una brida de cabeza a 7/8″ (22,22 mm) con una chapa de virola de 1/2″ (12,7 mm)? ¿Por qué son necesarios estos preparativos?

RESPUESTA: Una transición 3 a 1 se necesita hacer en la chapa más gruesa con el objeto de evitar la concentración de tensiones en la sección de transición entre las chapas de espesor desigual.

23. Un calderín de caldera de 5″ (127 mm) de espesor tiene una junta soldada longitudinal. ¿Cuál es la temperatura máxima bajo la cual puede ser rebajada de tensiones residuales y por cuánto tiempo?

RESPUESTA: Al menos 1.100 °F (593,3 °C) en un período de cinco horas si suponemos que el material tiene un número P bajo.

24. ¿Tiene un inspector autorizado algún derecho a estar en desacuerdo con los registros del fabricante y a requerirlo para una recualificación de un soldador o a tener realizados los ensayos físicos de soldadura?

RESPUESTA: Si el inspector tiene alguna duda concerniente la capacidad o habilidad de un soldador o del proceso, puede requerir o exigir una prueba de recualificación del proceso o del soldador.

25. ¿En qué posición deben estar las chapas de prueba cuando un soldador realice pruebas de soldadura con el objeto de recualificarse?

RESPUESTA: En cualquier posición que el soldador pueda encontrarse en su trabajo real. Si el soldador hace el ensayo de chapas en una posición horizontal o plana, no le estará permitido hacer el trabajo en otra posición distinta, como vertical o soldar «por encima de la cabeza».

26. *a*) ¿Es admisible situar un agujero en una junta soldada?
b) ¿Está permitido laminar y expansionar tubos en los agujeros situados en una junta soldada?

RESPUESTA:

a) Sí, supuesto que un examen de partículas magnéticas indique que la soldadura es consistente y correcta después de hacer el agujero.
b) Sí, lo mismo que en la sección *a*).

27. ¿Cuándo está disponible un soldador no cualificado para efectuar una soldadura de reparación de caldera? ¿Qué dos principios determinan el tipo de reparación que puede hacerse?

RESPUESTA: 1) la resistencia de la caldera no será dependiente de la soldadura. 2) El efecto del calor de la soldadura y las tensiones residuales remanentes no serán obstáculo ni detrimento.

28. ¿Cuál es la longitud máxima permitida de una pasada en una construcción remachada o soldada de caldera horizontal?

RESPUESTA: 12 pies (3,6 m).

29. *a*) ¿Pueden las juntas remachadas longitudinales de calderas viejas ser hermetizadas mediante soldadura?
b) ¿Pueden las juntas circunferenciales ser selladas por soldadura?
c) ¿Cuando se hacen reparaciones para calafatear los bordes de las soldaduras con pletina, qué precauciones deberían tomarse con respecto al remachado?

RESPUESTA:

a) No.
b) Sí.
c) Los remaches deberían ser retirados y los agujeros revisados después de la soldadura y deberían colocarse nuevos remaches. Esto es para evitar que los remaches al ser distorsionados por el calor de la soldadura puedan romperse. Consultar con el inspector de jurisdicción para su aprobación.

30. Describa brevemente la necesidad de la prueba hidrostática y otras pruebas físicas para aplicarse a un calderín soldado de caldera o recipiente antes de su aprobación.

RESPUESTA: Las uniones soldadas en calderines de caldera debe ser radiografiadas por secciones del calderín según especifica el Código, así como tratadas térmicamente para eliminar tensiones residuales de la soldadura. Se exige una prueba hidrostática después de que la caldera esté terminada, con agua a temperatura no menor de 70 °F (21 °C). La presión se aplicará gradualmente hasta 1,5 veces la máxima presión admisible marcada o estampada sobre la caldera. El control de la presión debe ser tal que la prueba de presión nunca exceda más del 6 por 100. La caldera debe examinarse cuidadosamente para detectar fugas cuando la presión se baje al máximo permisible grabado sobre la caldera.

31. *a*) ¿Quién es responsable de realizar las pruebas de los procedimientos de soldadura y de cualificación de los soldadores?
b) ¿Cuánto tiempo permanece en vigor la prueba de aprobación de un soldador?
c) ¿Quién conserva los registros de las calificaciones de procedimientos y de aprobación y aceptación del soldador?

RESPUESTA:

a) El fabricante es responsable de las pruebas, sujetas a la aprobación del inspector.
b) Indefinidamente, si se utiliza regularmente y se emplea en el mismo tipo de soldadura, espesor y material.
c) El fabricante.

32. ¿Qué significa precalentamiento y eliminación de tensiones residuales?

RESPUESTA: Precalentamiento es la aplicación de calor al metal de base antes de la operación de corte o soldadura. La eliminación de tensiones o tratamiento térmico después de la soldadura es el calentamiento uniforme de una estructura o de partes de la misma (por ejemplo, juntas soldadas) a una temperatura justo por debajo del rango crítico del metal. El propósito de la descarga de tensiones es descargar o eliminar la mayor parte de todas las tensiones residuales que puedan existir en una junta o unión soldada de los efectos térmicos causados por el proceso de soldadura.

33. ¿Qué temperatura debería usarse si se encuentra necesario precalentar y eliminar tensiones de soldadura de un acero de bajo contenido de carbono?

RESPUESTA: El Código especifica temperaturas de precalentamiento para los diferentes tipos de metales según sus números P. Generalmente, la temperatura de precalentamiento está por debajo de 450 °F (23 °C). Las temperaturas del postratamiento de la soldadura a aplicar a los diferentes tipos de metales están también especificadas en el Código por grupos de números P. Para chapas planas de aceros al carbono, ésta es generalmente de 1.100 °F (593 °C) a mantener durante una hora por cada pulgada (25 mm) de espesor de chapa.

34. *a*) ¿Qué se entiende por una prueba no destructiva de una junta soldada? Dar algunos ejemplos típicos.
b) ¿Qué podría causar el rechazo de una pieza de prueba de soldadura?

RESPUESTA:

a) Una prueba que no destruye el componente o pieza de caldera, como lo son las pruebas radiográficas, hidrostáticas, de ultrasonidos, de tinte penetrante y partículas magnéticas.

b) Porosidad, falta de penetración, inclusiones de escoria y grietas en la superficie de soldadura o cualquier otro defecto que no cumpla con los requisitos del Código.

35. Señale los requisitos esenciales que deben cumplir para ser permitidas las soldaduras de tubería o conexiones de tubo que no requieran examen radiográfico o prueba de golpeteo con martillo.

RESPUESTA: Si el procedimiento y el soldador han sido cualificados según los requisitos del Código, las juntas circunferenciales soldadas sobre tuberías no requieren examen radiográfico supuesto que:

1. Si van a contener vapor, el tubo o cilindro no tiene más de 16″ (406 mm) de diámetro nominal y no más de $1\ ^5/_8$″ (41,3 mm) de espesor de chapa. Si va a contener agua, no más de 10″ (254 mm) de diámetro nominal del tubo o cilindro y no más de $1\ ^1/_8$″ (28,6 mm) de espesor. En ambos casos, no están en contacto con los gases del hogar.
2. Si están en contacto con los gases del hogar, pero no con su radiación, no más de 6″ (1.524 mm) de diámetro nominal del tubo o más de 3/4″ (19 mm) de espesor. Si están en contacto con los gases del hogar y con la radiación, no más de 4″ (101,6 mm) de diámetro nominal del tubo y no más de 1/22″ (12,7 mm) de espesor.
3. Si los tubos tienen cinco o más filas entre ellos y el hogar y los tubos están en contacto con los gases del hogar que no excedan de 850 °F (454 °C), no se requiere examen radiográfico.

Pruebas no destructivas

36. Defina la vida media de un isótopo.

RESPUESTA: El termino vida media se refiere al decrecimiento en intensidad de la radiación de un isótopo; la vida media es el número de años que pasan para que el isótopo disminuya un 50 por 100 su actual intensidad (tiempo de referencia).

37. Si un isótopo tiene una intensidad de 80 curios (Ci), ahora con una vida media de 10 años, ¿cuál será su intensidad en 30 años?

RESPUESTA: Al final de 10 años, la intensidad será de 40 Ci. Al final de 20 años, la intensidad será de 20 Ci. Al final de 30 años la intensidad será de 10 Ci.

38. Nombre dos medios de medida que se utilicen para comprobar la dosis acumulativa en un individuo expuesto.

RESPUESTA: Los dosímetros de bolsillo y las placas de película se usan para comprobar la dosis acumulativa de un individuo.

39. *a*) ¿Cómo se tara el nivel energético de una maquina de rayos X?
b) ¿Qué penetra mejor en un material, las ondas cortas o las ondas largas?
c) ¿La tensión eléctrica alta o baja produce ondas cortas?

RESPUESTA:

a) El nivel de energía de una maquina de rayos X se tara por el voltaje o tensión de punta (o pico) al cual emiten los electrones en el tubo-placa (de señal) y se expresa como sigue: kVP = kilovoltios pico (1.000 V) y MV = megavoltios (1 millon de voltios).

b) y *c*) Las ondas cortas tienen gran poder de penetración y las grandes tensiones de la fuente de radiación producen ondas de longitudes más cortas; por tanto, la alta tensión tiene mayor poder de penetración.

40. *a*) Cite dos factores que controlen el contraste en radiografía.
b) Cite los dos tipos principales de pantallas usadas en radiografía.

RESPUESTA:

a) La tensión eléctrica o nivel energético de la fuente de radiación a que la radiografía estará sometida y el tipo de película usado.
b) Fluorescente y de hoja de plomo.

41. *a*) Nombre dos fuentes de radiación permitidas para examen radiográfico en el Código de calderas.
b) ¿Qué película se usará para examen radiográfico de calderas de potencia?

RESPUESTA:

a) Rayos X e isótopos radiactivos.
b) La película tipo 4 puede permitirse para calderas así como también de tipo 2, como se especifica en la Sección V del Código.

42. ¿Qué debe aparecer en una imagen radiográfica para probar la técnica y sensibilidad de un examen radiográfico?

RESPUESTA: La imagen radiográfica debe aparecer y mostrar el penetrámetro y el orificio especificado en el penetrámetro para probar que la técnica utilizada fue de la sensibilidad apropiada. Adicionalmente, las radiografías deberían mostrar el número identificativo y letras de forma que se puede trazar o marcar la zona radiografiada.

43. *a*) ¿Cuál es el propósito de un penetrámetro? ¿Qué es la sensibilidad del penetrámetro?
b) ¿De qué tipo de material deberían estar fabricados los penetrámetros cuando vayan a usarse para radiografiar soldaduras?

RESPUESTA:

a) El penetrámetro se usa para obtener evidencia en una radiografía de que la técnica utilizada al exponer una soldadura a la radiografía mostrará ciertos defectos mínimos considerados aceptables, pero mostrará defectos considerados inaceptables para los requisitos del Código. La sensibilidad del penetrámetro se refiere a la calidad de la imagen y al más pequeño orificio o agujero que puede ser «detectado» o visto; por otra parte, es una medida de la menor o mínima discontinuidad que puede medirse u observarse por radiografía sobre un espesor determinado de metal.
b) Los penetrámetros deberían fabricarse de un material radiográficamente similar al de la pieza u objeto que está siendo inspeccionado.

44. ¿Por qué los anillos o juntas en anillo no consumibles del lado de agua de las soldaduras no son recomendables?

RESPUESTA: La grieta formada por la pieza o componente de la caldera y el retroanillo puede originar corrosión y desarrollar una grieta que puede, a su vez, originar un fallo o rotura prematura de la pieza de la caldera. Esto es especialmente aplicable a los anillos usados sobre el diámetro interior de los tubos.

45. *a*) ¿Dónde se colocan normalmente los penetrámetros en relacción con la soldadura y la fuente de radiación?
b) Si el penetrámetro está colocado sobre la película del lado de la soldadura, ¿cómo se identifica?

RESPUESTA:

a) Los penetrámetros se colocan normalmente adyacentes al lugar de la soldadura y del lado de la fuente del lugar a radiografiar.
b) Debe colocarse una letra «F» guía al menos situada tan alta como el número de identificación y adyacente al penetrámetro para aquellos casos donde el penetrámetro se coloque del lado de la película, y no del lado de la fuente.

46. ¿Cuál debe ser el diámetro del agujero en un penetrámetro en relacción al penetrámetro *t*?

RESPUESTA: Es 2*t* o el doble del espesor del penetrámetro, excepto para penetrámetros inferiores a 0,010″ (0,254 mm) de espesor, donde el diámetro del orificio debe de ser de un mínimo de 0,020″ (0,508 mm).

47. *a*) ¿Por qué es necesario eliminar las ondulaciones o rugosidades de la soldadura cuando ésta va a radiografiarse?
b) Liste algunos típicos defectos que deben evitarse en la película radiográfica.

RESPUESTA:

a) Es necesario eliminar irregularidades de las superficies soldadas de forma que ninguna imagen radiográfica tomada de la soldadura enmascare, oculte o de otro modo dificulte la identificación de alguna discontinuidad inaceptable que pueda aparecer sobre la imagen radiográfica.
b) Las radiografías deben estar libres de los siguientes defectos de modo que las discontinuidades puedan aparecer adecuadamente identificadas: velado (nebuloso), rayados, marcas de agua, manchas, arañazos o rasguños, marcas de dedos, rizaduras, polvo, tiznados, rasgaduras y pérdidas de detalle sobre la imagen.

48. ¿Qué dos imperfecciones en una soldadura se consideran inaceptables por el Código y aparecen en la película radiográfica?

RESPUESTA: Cualquier tipo de grieta o zona de fusión incompleta o penetración se considera inaceptable.

49. ¿Cuánto tiempo debe retener un fabricante de calderas las radiografías tomadas a una caldera?

RESPUESTA: Un conjunto de radiografías tomadas a una caldera deben guardarse por el fabricante, al menos, durante cinco años.

50. *a*) ¿A qué tipo de materiales puede aplicarse los exámenes de partículas magnéticas?
b) ¿En las pruebas de partículas magnetizadas, cuál es el máximo espacio permitido?
c) En las pruebas de partículas magnéticas, ¿cuál es la dirección del campo magnético en relación al flujo de corriente?

RESPUESTA:

a) Sólo materiales ferromagnéticos.
b) Un máximo de 8″ (203 mm).
c) A ángulos rectos, o sea perpendiculares al flujo de corriente.

51. *a*) ¿Cuándo se obtienen los mejores resultados en la inspección por partículas magnéticas, cuando el campo es paralelo a la discontinuidad o cuando el campo magnético es perpendicular a las discontinuidades? *b*) Diferenciar o describir las diferencias entre el método continuo y el método residual, cuando se usan en la inspección por partículas magnetizadas.

RESPUESTA:

a) Los mejores resultados se obtienen en una inspección de partículas magnéticas cuando el campo magnético es paralelo a la discontinuidad, cuando el campo magnético es perpendicular a la discontinuidad, cuando la corriente eléctrica magnetizante está fluyendo paralela a la discontinuidad.

b) En el método continuo, el polvo seco se aplica a la superficie del trabajo sometido a prueba mientras la corriente magnetizante está fluyendo. En el método residual el polvo se aplica a la superficie de trabajo después de que la corriente magnetizante ha sido desconectada. Este método requiere que el trabajo o pieza retenga el magnetismo, mientras el método continuo puede utilizarse sobre un material que tenga baja resistividad magnética.

52. ¿Cuántos exámenes de partículas magnéticas se requieren de la zona a examinar en una pieza sometida a pruebas?

RESPUESTA: Al menos dos exámenes separados serán llevados a cabo en cada zona. El segundo test producirá líneas de flujo magnético aproximadamente perpendiculares a las del primer test. Esto es necesario para detectar discontinuidades que pueden ser paralelas al campo magnético y así no visibles si sólo se realiza una prueba.

53. Cite los tres tipos de penetrantes reconocidos por el Código al realizar exámenes con líquidos penetrantes.

RESPUESTA: Lavables con agua, post-emulsionantes y eliminables con solventes.

54. ¿Cómo trabaja el líquido penetrante de modo que pueda utilizarse para exámenes de discontinuidades?

RESPUESTA: El examen por líquido penetrante se usa para detectar discontinuidades que están abiertas a la superficie de materiales no porosos. Un líquido denominado penetrante se aplica primeramente a la superficie de la pieza a examinar. El líquido penetrante se deja durante algún tiempo de modo que pueda entrar por cualquier poro o discontinuidad (grieta). Después se retira con un paño el líquido sobrante. Un agente secador se aplica a la superficie. Finalmente, se rocía un revelador sobre la pieza. Cualquier líquido penetrante atrapado en la discontinuidad por debajo de la superficie humedecerá el revelador de forma que se adhiere y así expone la discontinuidad, lo que es necesario para evaluar la discontinuidad y ver si es aceptable o al contrario rechazable a no ser que se repare.

55. ¿Cuáles son los líquidos penetrantes del tipo A y B utilizados en la inspección por líquidos penetrantes?

RESPUESTA: El tipo A usa penetrante fluorescente, mientras que el del tipo B utiliza un tinte penetrante visible para el ojo humano.

56. Nombre los dos tipos de principios ultrasónicos utilizados en pruebas no destructivas para piezas o partes de recipientes a presión.

RESPUESTA: El primer tipo de principio ultrasónico utilizado en pruebas no destructivas es el de impulso eco. En este sistema, los impulsos sónicos se envían a través del material, y cualquier superficie refleja el eco de este sonido. Las señales se trasmiten a una pantalla de tubo de rayos catódicos (CRT) y, con un ajuste adecuado, el principio del eco se usa para detectar defectos en la interfaz de los materiales que producen ecos.

El segundo principio ultrasónico utilizado en pruebas ultrasónicas es el principio de la resonancia. En este sistema, la frecuencia del sonido de un instrumento se varía hasta que alcanza el material sometido a prueba o que está en resonancia con él. Mediante principios de circuitos eléctricos y electrónicos, la frecuencia resonante puede convertirse en medida del espesor del material sometido a prueba. Ésta es la aplicación principal para instrumentos de sonido con efecto resonante (ultrasónicos).

57. *a*) ¿Qué método de examen ultrasónico de soldaduras está permitido por el Código?
b) ¿Cuándo es permisible utilizar el examen por ultrasonidos en uniones soldadas, en calderas de potencia?

RESPUESTA:

a) Los exámenes ultrasónicos deberán ejecutarse con un sistema del tipo impulso eco con rangos de frecuencia entre 1 a 5 MHz.
b) Cuando es impracticable usar una combinación de parámetros radiográficos de modo que una fisura o precisión geométrica de 0,07 no sea excedida, entonces el examen ultrasónico deberá usarse para comprobar las soldaduras y zonas afectadas térmicamente de estas uniones que precisen examen radiográfico por las normas de la Sección I del Código.

58. Describa cómo deben prepararse las superficies siguientes para el examen ultrasónico: *a*) superficies de contacto, *b*) superficies soldadas y *c*) material de base.

RESPUESTA:

a) Las superficies de contacto afinadas deberán estar libres de salpicaduras y de toda aspereza que pueda interferir con el movimiento libre de la unidad investigadora o dificultar la transmisión de vibraciones ultrasónicas.
b) Las superficies de soldadura acabadas, donde sean accesibles, serán de la adecuada finura para evitar interferencias con la interpretación del examen. La superficie de soldadura se unirá suavemente en las superficies del material base adyacente.
c) Después de que la soldadura esté completada, pero antes del examen por haz angular, el área o zona del material base a través del cual viajará el sonido en el examen mediante haz angular, deberá estar completamente escaneada con una unidad de haz angular recto para detectar reflectores que afectarán la interpretación de los resultados del haz angular. Deben tenerse en cuenta estos reflectores durante la interpretación de los resultados del examen de la soldadura, pero su detección no es causa para rechazar el material base.

59. *a*) Cite tres tipos de ondas usadas en inspecciones ultrasónicas.
b) ¿Qué significa el termino CRT aplicado a las pruebas ultrasónicas?
c) ¿Qué labor realiza un elemento piezoeléctrico aplicado a pruebas ultrasónicas?

RESPUESTA:

a) Ondas penetrantes rectas, ondas de haz angular y ondas superficiales.
b) Tubos de rayos catódicos. Éste es un tubo en el que aparecen las señales ultrasónicas. Si está ajustado adecuadamente, mostrará «bips» mientras el sonido penetre y saltos cuando haya una falta o una superficie opuesta.

c) El elemento piezoeléctrico es un cristal cuidadosamente fabricado que tiene la propiedad de convertir señales eléctricas en vibraciones mecánicas o señales sónicas. Los cristales también tienen capacidad inversa, principalmente de convertir vibraciones o señales sónicas en señales eléctricas.

60. *a*) ¿Qué frecuencia nominal deberá utilizarse para calibrar por el método ultrasónico de haz angular?
b) ¿Qué se considera la respuesta de referencia primaria de un impulso eco usando el método del haz angular cuando se está calibrando un equipo de ultrasonidos?
c) Defina el método de transferencia ultrasónica usado para correlacionar la respuesta del bloque de calibración básica y del material de producción cuando se utiliza el método del haz angular.

RESPUESTA:

a) La frecuencia nominal será de 2,25 MHz a no ser que una variable, como la estructura del grano del material producido, requiera el uso de otras frecuencias para asegurar la penetración adecuada.
b) El 75 por 100 de toda la pantalla del tubo de rayos catódicos.
c) Los métodos de referencia se usan para correlacionar o comprobar la respuesta del bloque de calibración básica y del componente a examinar. Las lecturas se toman sobre el bloque de calibración y las diferencias en lecturas del componente sometido a prueba y del bloque de referencia se corrigen recalibrando el instrumento.

61. *a*) ¿Cuando uno está examinando soldaduras por el método de ultrasonidos, qué servirá como reflectores básicos de calibración y cuáles son los requisitos del material para estos reflectores de calibrado?
b) Al examinar soldaduras ultrasónicamente por el método del haz angular, ¿cómo debe utilizarse el método de transferencia para comprobar la técnica sobre recipientes soldados y tubos soldados?

RESPUESTA:

a) Los agujeros u orificios taladrados, se usarán como reflectores básicos de calibración, y estos agujeros deben localizarse en el metal base o exterior del mismo o pueden localizarse en un bloque de calibración de estructura metalúrgica similar a la del material que está siendo soldado.
b) Para recipientes, el método de transferencia debe utilizarse al menos una vez por cada 10 ft (3 m) de soldadura o menos por chapa, y será llevado a cabo al menos dos veces por cada tipo de unión soldadura. Para tuberías, el método de transferencia debe utilizarse, como mínimo, una vez por cada parte soldada en tubos de 10″ (254 mm) de diámetro y mayores y una vez por cada 5 ft (1,5 m) de soldadura para tubos menores de 10″ (254 mm) de diámetro.

62. *a*) ¿Quién tiene la responsabilidad de preparar un informe de examen por ultrasonidos para calderas de potencia?
b) ¿Qué información deberá contener el informe del examen por ultrasonidos?
c) ¿Qué longitud mínima de discontinuidad no está permitida por el Código sobre soldaduras examinadas por el método ultrasónico y cuando la chapa base a soldar es de 3″ (76,2 mm) de espesor?

RESPUESTA:

a) El fabricante de calderas.

b) 1) Todos los procedimientos y equipos estarán identificados suficientemente para permitir duplicación de los exámenes en fecha posterior. Esto incluirá datos para la calibración inicial del equipo y cualquier cambio significativo en subsiguientes recomprobaciones. 2) Un dibujo o croquis indicando la/s soldadura/s examinada/s, el ítem o número de pieza y la identificación del operador que ha llevado acabo cada inspección o pieza requerida. 3) Un registro de zonas reparadas será guardado, así como tambien los resultados del reexamen de las zonas reparadas.

c) Las discontinuidades con longitud de 3/4″ (19 mm) o más para espesores de chapa de más de 2 $^{1}/_{4}$″ (57,2 mm).

63. *a*) En el examen ultrasónico de fundiciones por el método del haz angular, ¿con qué frecuencia se debe utilizar el método de transferencia para controlar el calibrado del instrumento?

b) ¿Cuándo se deben usar ambos métodos el del haz angular y el del haz recto el examen ultrasónico de juntas soldadas?

c) ¿Cuándo deben utilizarse bloques planos de calibración básica para calibrar instrumentos ultrasónicos que se utilizan al examinar soldaduras circunferenciales en superficie de contacto curvas?

RESPUESTA:

a) El método de transferencia será utilizado para comprobar calibres contra el calibre «estándar» al menos cada media hora.

b) Si la geometría de la junta soldada no hace posible realizar el examen por el método del haz angular por ambos lados de una soldadura en una sola superficie o combinación de superficies, deben usarse ambos métodos, el del haz angular y el del haz recto, para examinar la unión o junta soldada.

c) Para superficies en contacto con curvaturas mayores de 20″ (508 mm) de diámetro, deben usarse bloques planos de calibración básica o bloques de la misma curvatura de la pieza a examinar.

64. *a*) Cite los dos tipos de campos eléctrico y magnético que a una pieza bajo examen pueden aplicarse cuando está siendo probada por corrientes parásitas.

b) Describa el término inductor cuando se aplica a la prueba corrientes parásitas.

c) Cuando se aplican las pruebas de corrientes parásitas, ¿cómo son alteradas la magnitud y la dirección de las corrientes parásitas inducidas?

RESPUESTA:

a) El efecto de las corrientes parásitas sobre la pieza que está siendo probada puede ser inducir corrientes electromagnéticas y, si el material es magnético, inducir o asentar campos magnéticos.

b) El inductor es una bobina electromagnética que es operada en corriente alterna y que se posiciona cerca del artículo sometido a prueba y que, cuando está energizada, induce corrientes parásitas, es sede de campos magnéticos o ambos casos a la vez en la pieza sometida a examen.

c) La magnitud y dirección de las corrientes inducidas son alteradas por las discontinuidades del metal que está siendo sometido a prueba.

65. *a*) ¿Cómo se nota el cambio en las corrientes inducidas?

b) ¿Cómo se nota el cambio en el flujo magnético inducido cuando se está utilizando la prueba de corrientes parásitas?

c) ¿Qué frecuencia de la corriente alterna se usa en la prueba de corrientes parásitas?

RESPUESTA:

a) El cambio en las corrientes parásitas inducidas se detecta mediante una bobina detectora que está conectada a un circuito eléctrico. Este circuito registra la discontinuidad en diversas variables eléctricas, dependiendo del diseño, pero éstas pueden ser tensión, corriente o impedancia. Éstas están relacionadas en magnitud con la discontinuidad a través o en relación con los bloques de referencia.
b) La distribución del flujo magnético inducido está afectada también por las discontinuidades, y esto se revela por el cambio en la distribución del flujo magnético en la medida que está afectada por el defecto.
c) La frecuencia elegida para excitar el campo electromagnético depende de la profundidad de la penetración bajo la superficie de la parte que está siendo probada. Las frecuencias varían desde 500 a 20.000 Hz (ciclos por segundo). Las altas frecuencias se utilizan para tubos de pequeño espesor de pared y de gran diámetro y no magnéticos.

66. ¿Cómo definiría una prueba de fuga aplicada a la comprobación de soldaduras en un recipiente a presión?

RESPUESTA: Las pruebas de fugas de las soldaduras de los recipientes a presión se usan para determinar discontinuidades que se extiendan a lo largo de una soldadura y que producen una pérdida bien sea líquida o gaseosa. Los tests usados en la prueba de pérdida pueden variar desde la prueba hidrostática utilizando agua hasta sofisticados medios usando ojos y equipo electrónico para la detección del gas fugado a través de una discontinuidad.

67. *a*) ¿Quién es responsable de realizar un procedimiento de examen no destructivo?
b) ¿Qué incluirá?
c) ¿Cómo se prueba el procedimiento?
d) ¿Para quién estará disponible el procedimiento?

RESPUESTA:

a) El fabricante o el que realiza el ensamblaje según la Sección V del código ASME; para inspección en servicio nuclear, el propietario de la central nuclear es responsable de la cualificación del personal de ensayo no destructivo.
b) Para trabajos nucleares, todos los exámenes no destructivos serán llevados a cabo según un procedimiento escrito, que indicará claramente el método y técnica a utilizar para inspeccionar adecuadamente el recipiente o vasija sometido a prueba. La excepción a esta regla en calderas de potencia se detalla en el artículo 3 de la Sección V para exámenes radiográficos en la que no se requiere cualificación de procedimiento en tanto en cuanto se cumplan los requisitos de densidad e imagen del penetrámetro. Como ejemplo de buenos procedimientos de examen radiográficos para vasijas nucleares, debe detallarse lo siguiente: 1) material a radiografiar; 2) rango de espesor a radiografiar; 3) tipo de radiación, fuente, tensión eléctrica y fabricante del equipo fuente de radiación; 4) calidad de película o tipo a utilizar; 5) tipo y espesor de pantallas intensificadoras y filtros a utilizar; y 6) mínima distancia entre película y fuente de radiación.
c) El procedimiento debe ser tal para probar el método a utilizar que muestre los defectos no permitidos por el Código. En todos los casos el procedimiento debe demostrar esta capacidad para satisfacción del inspector autorizado. Ésta es una buena regla a seguir en trabajos de inspección.
d) El personal de exámenes no destructivos del fabricante y el inspector autorizado.

Capítulo 4

CALDERAS ELÉCTRICAS Y DE APLICACIONES ESPECIALES

CALDERAS ELÉCTRICAS

Hay dos tipos básicos de calderas eléctricas disponibles. Primero, unidades de baja capacidad y tensión, consistentes básicamente en resistencias eléctricas. En el tipo de resistencias, la corriente eléctrica genera calor al pasar a través de una resistencia o elementos de resistencias. Éstas constan de unos hilos encapsulados y con una cubierta metálica aislada eléctricamente y están sumergidas en el agua para generar vapor a presión moderada, con capacidad de producción baja. Estos tipos de unidades no dependen de la conductividad o resistencia del agua para generar calor. Además, en calderas de electrodos, la corriente fluye a través del agua, como se muestra en las Figuras 4.1*a*, *b* y *c* de la página siguiente, y no a través de hilos. El líquido de la caldera convierte la energía eléctrica en térmica.

La crisis energética y las regulaciones de contaminación del aire han creado una demanda de calderas eléctricas de producción elevada, por encima de los 4.500 kg/hr de producción. Allí donde la energía eléctrica es barata, las unidades de alta tensión están disponibles, y ahora con capacidades en aumento. Una unidad de alta tensión se clasifica como caldera con una de energía eléctrica entre 2.300 y 15.000 voltios (V). La caldera de vapor de electrodo de alta tensión mostrada en la Figura 4.1*a* tiene tres compartimentos de generación, uno para cada fase o electrodo. El vapor se genera a medida que la corriente eléctrica va de los electrodos a las paredes del neutro de los compartimentos cilíndricos que los contienen.

Las calderas de alta tensión de electrodos separados, como se ve en las Figuras 4.1*b* y *c*, controlan la producción regulando la cantidad de agua pulverizada sobre los electrodos que están suspendidos e inmersos en el espacio de vapor. El camino de la corriente se crea a medida que el agua fluye a través de los pasos de un compartimento de almacenaje hacia los electrodos. El agua que no se convierte en vapor escurre por los electrodos y cae a un contraelectrodo. Esto crea un segundo camino de la corriente para producción de vapor: desde los electrodos al contraelectrodo. El agua restante retorna al depósito.

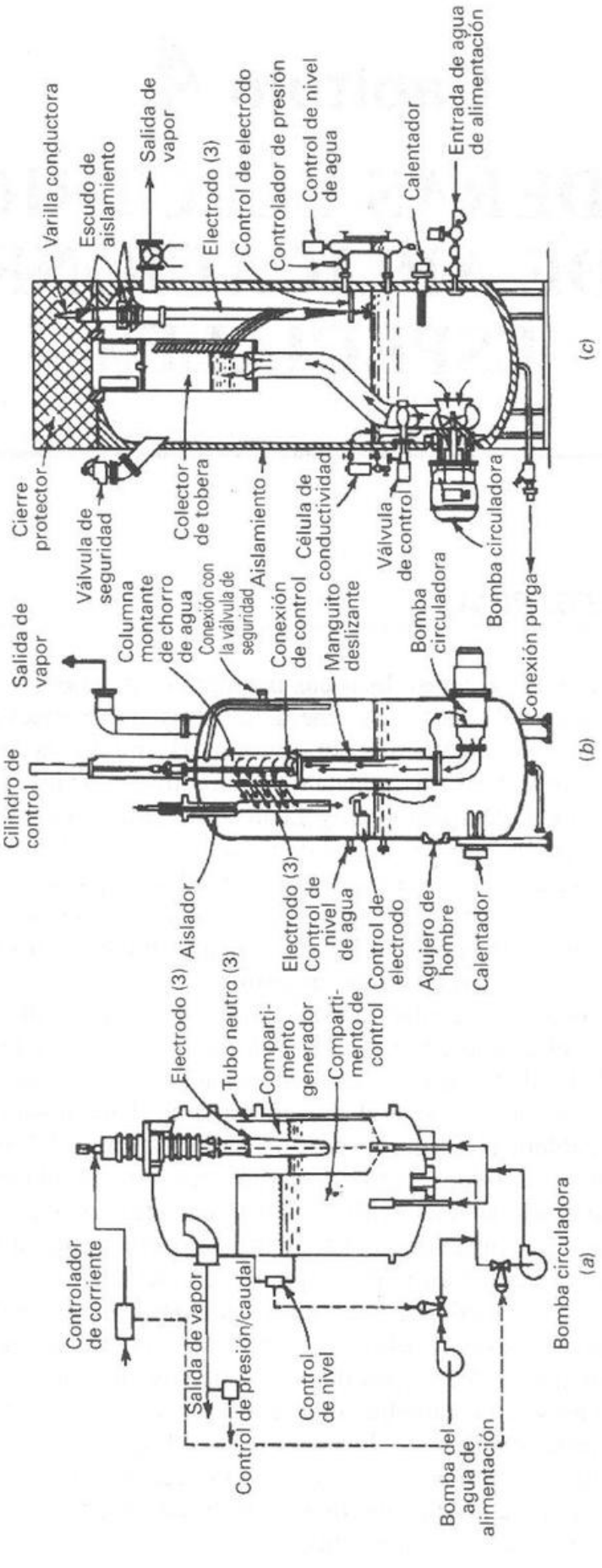


Figura 4.1. Tipos de calderas de electrodo. (*a*) La corriente fluye a través del fluido hasta la pared del compartimento generador. (*b*) Caldera de alta tensión con electrodo rociado con manguito deslizante de control para regular el caudal de agua. (*c*) Caldera de alta tensión con electrodo rociado y con caudal de agua regulado por un distribuidor rotativo.

Las calderas de electrodos son compactas y vienen completamente equipadas con controles y dispositivos de seguridad. La mayoría de las calderas tiene controladores para mantener la conductividad dentro de los límites del fabricante, monitorizando el agua y añadiendo productos químicos a medida que se necesitan, así como purgando la caldera cuando es necesario. Con la caldera de electrodos es necesario controlar la conductividad dentro de rangos específicos según las prescripciones del fabricante. Si la conductividad es demasiado baja, puede no alcanzarse la producción de la caldera; si es demasiado alta, puede ocurrir un cortocircuito. El tratamiento del agua es también importante con estas calderas, porque un tratamiento defectuoso puede afectar a la conductividad así como crear problemas en el vapor, como el espumado.

La mayoría de los estados incluye a las calderas eléctricas en sus reglamentaciones. El código ASME constata que las calderas eléctricas de un diseño que emplee cubierta removible, que permita un fácil acceso para inspección y limpieza de la virola, y que tengan un contenido normal de agua que no exceda de 100 galones (378,54 l), no necesitan estar provistas de aberturas de inspección ni desagües.

El acceso usual para inspección y limpieza es la conexión de la cubierta del electrodo con el interior del la caldera. Debe desplazarse para comprobar las condiciones internas de la caldera. Al mismo tiempo comprobar las condiciones de los elementos eléctricos.

La capacidad de una válvula de seguridad viene determinada por la potencia. La capacidad mínima de la válvula de seguridad debe ser, al menos, de 1,59 kg/(hr/kW). Esto es cierto siempre que se trate de una caldera de alta o baja presión. En base a 0,25 kcal/hr, el requisito es de 882 kcal/hr por cada kilovatio de entrada de energía.

Aunque se requieren controles de bajo nivel de agua para las calderas eléctricas de resistencias, éstos no son necesarios para calderas del tipo de electrodos. La razón es que aquéllas no pueden generar vapor cuando el nivel de agua es bajo o cuando no se precisa vapor. Para asegurar que la caldera tiene la salinidad adecuada, se suministra generalmente un control de conductividad. Esto significa que se añaden sales a la unidad o se purga, dependiendo de las condiciones del agua. Todas las calderas eléctricas deberían estar construidas de acuerdo con el código ASME de calderas y también aprobadas por laboratorios aseguradores certificados.

CALDERAS DE AGUA DE ALTA TEMPERATURA

Un sistema de agua caliente de alta temperatura (HTHW), mostrado en la Figura 4.2 de la página siguiente, es una caldera térmica que utiliza agua a elevada temperatura, normalmente a más de 300 °F (149 °C) y sin un límite específico de presión. Sin embargo, el código de presión para virolas de calderas ASME, Sección I, define una HTHW como la que usa agua a una temperatura por encima de 250 °F (149 °C) y a una presión por encima de 160 psi (11,2 kg/cm^2). Los sistemas HTHW normalmente no están diseñados para temperaturas que sobrepasen los 260 °C. Las temperaturas de trabajo dentro del rango de 177 °C a 232 °C son las que se encuentran más frecuentemente. Por encima de 260 °C se utilizan otros fluidos térmicos para obtener temperaturas elevadas, como el *Downtherm* y fluidos inorgánicos similares.

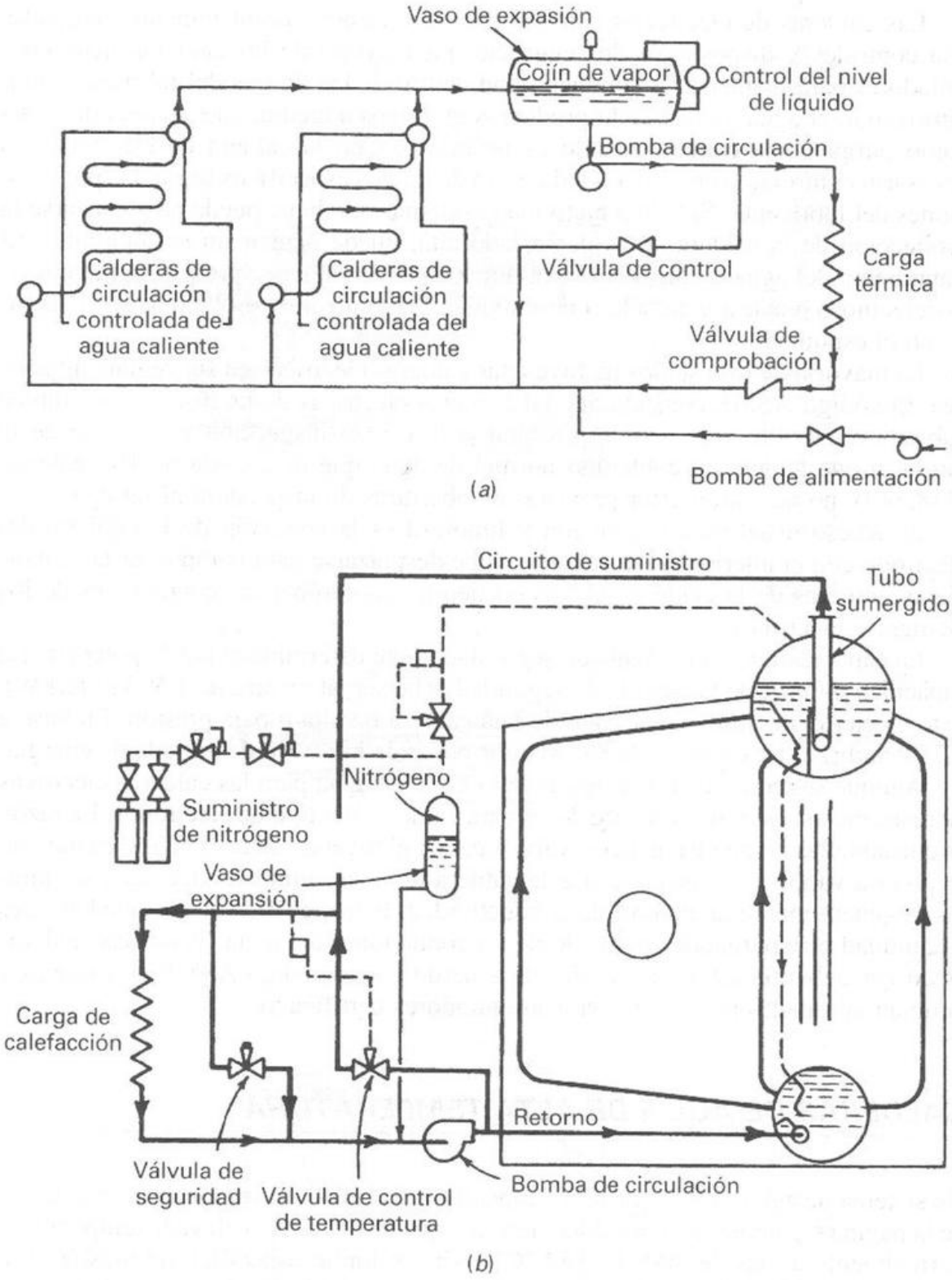


Figura 4.2. Las calderas de agua caliente de alta temperatura usan: (*a*) vaso de expansión; (*b*) calderín de caldera para permitir la dilatación y contracción del agua con los cambios de temperatura.

A estas temperaturas, el agua en su estado líquido puede existir sólo a presiones por encima de las correspondientes de saturación. Los sistemas de alta temperatura

tienen un amplio campo de utilización para suministrar las necesidades de calefacción de grandes aeropuertos, bases militares, edificios de oficinas, hospitales, universidades y otros grandes complejos de edificios. La aplicación de los sistemas HTHW se ha extendido a muchos procesos industriales en los campos de la química, plásticos, goma, galvanotecnia, papel, textiles, etc.

Ventajas de los sistemas de agua a alta temperatura (HTHW). Para muchas aplicaciones, los sistemas de agua a alta temperatura tienen distintas ventajas sobre los sistemas de vapor. Las principales ventajas son:

1. A causa de su gran capacidad de almacenaje térmico, un sistema HTHW permite un control muy estrecho de la temperatura, lo cual es importante en muchas aplicaciones de procesos.
2. La gran cantidad de calor del sistema constituye una reserva térmica de modo que las variaciones de carga tienen un mínimo efecto sobre la caldera, permitiendo el uso de una caldera de menor capacidad unitaria.
3. La ausencia de corrosión en la línea de retorno en un sistema HTHW, que es otro problema frecuente en un sistema de vapor, es otra ventaja.
4. No se necesitan purgadores, bombas de condensado, depósitos, venteos ni otros equipos de retorno de condensado, originándose así un coste primario menor, menor mantenimiento y ausencia de pérdidas de vapor.
5. Se necesita una pequeña cantidad de agua de reposición, así que no hay necesidad de un sistema caro de tratamiento de agua.

Desventajas de los sistemas de agua de alta temperatura (HTHW). Hay varias desventajas; una de las más importantes es el gran volumen de agua del sistema. Esto produce los siguientes inconvenientes:

1. El sistema toma más tiempo para calentarse en el arranque.
2. Se necesita más tiempo para enfriarse cuando se ha de hacer una reparación o alteración y hay que descargar mucha agua.
3. Si se rompe una tubería o recipiente a presión, el contenido de agua, al estar por encima del punto de ebullición atmosférico, se convertirá parcialmente en vapor de forma instantánea con un poderoso efecto disruptor. Incluso una fuga relativamente pequeña puede producir un daño considerable por el agua antes de que el sistema pueda ser despresurizado.

Ambos tipos de caldera, de tubos de humos y de tubos de agua, se usan para estos sistemas. La principal ventaja de las calderas pirotubulares para esta aplicación es que normalmente son más baratas en los tamaños por debajo de 600 HP. Por encima de este tamaño, se utilizan las de tubos de agua. Sorprendentemente, la caldera de cajas o cabezales se utiliza principalmente para las menores capacidades; sin embargo, la unidad de circulación forzada (tipo *LaMont*) se usa mucho.

Los generadores de agua caliente de tubos de agua están disponibles en tamaños compactos hasta los 37,8 millones de kcal/hr, y para temperaturas de agua hasta los 343 °C. El equipo de combustión utilizado es el mismo que el utilizado para las calderas de vapor. Pueden usarse todos los tipos de combustibles.

Presurización y control de caudal. Hay tres consideraciones en el diseño de un sistema HTHW, que no son fundamentales en el diseño de sistemas de vapor; son:

1. Cómo mantener la presión de agua en circulación por encima de la presión de saturación para la temperatura requerida de agua.
2. Cómo proceder para absorber la expansión del sistema de calefacción y generador de agua.
3. Cómo asegurar tasas de caudal uniformes bajo todas las condiciones de operación.

Hay tres métodos de presurización utilizados —colchón de vapor, gas y mecánicos— y dos métodos de acomodar la expansión del agua —en un acumulador separado o en el calderín superior de la caldera para unidades del tipo de calderín que sirven a los sistemas pequeños de calefacción.

La disposición del cojín de vapor se utiliza normalmente para capacidades grandes y sistemas de agua caliente de funcionamiento continuo, como los que se utilizan en muchos aeropuertos, porque mantiene un control estricto de la temperatura del agua, más que los otros dos. Véanse las Figuras 4.2*a* y *b*.

El agua caliente a alta temperatura de la caldera descarga en un vaso de expansión separado, donde una pequeña cantidad del fluido se vaporiza instantáneamente para mantener la presión del sistema. La tasa de combustión de la caldera está controlada por la presión del calderín. El calderín está situado muy por encima de la caldera para permitir el libre desprendimiento de vapor y asegurar una altura razonable o presión en aspiración de la bomba de circulación. Es necesario evitar la introducción de grandes cantidades de agua fría de retorno en el calderín para evitar el colapso del cojín. Tal condición provoca vaporización instantánea y ariete o golpe hidráulico en el sistema de tuberías.

En el *sistema de presurización por gas inerte*, un colchón de nitrógeno se mantiene en un recipiente de expansión que está parcialmente lleno con agua del sistema de circulación. La presión del nitrógeno se mantiene por encima de la de saturación del líquido.

Las calderas de agua caliente de alta temperatura deberían tener un corte de combustible por bajo nivel de agua en el caso de que el nivel de agua caiga por debajo de un nivel seguro. En las unidades de circulación forzada, es deseable un dispositivo de presión diferencial o control de caudal, de modo que el combustible para el quemador se corte en el caso de que no haya circulación de agua. Las calderas de agua caliente de alta temperatura pueden no necesitar un nivel de agua de vidrio o grifos de prueba si la caldera está llena de agua y tienen un vaso de expansión exterior. Sin embargo, si la caldera es de circulación natural con calderín, entonces el código exige un nivel de vidrio y grifos de prueba, porque el calderín puede tener variaciones de nivel de agua que pueden ser puestas de manifiesto al operador que comprueba si son correctas. La Figura 4.2*b* muestra una caldera de tipo D, de circulación natural, en la que el calderín actúa como vaso de expansión. Esta caldera (sin calderín) necesitará un nivel de vidrio por reglamentación.

Transferencia de calor a alta temperatura mediante fluidos orgánicos líquidos y vapores. Los fluidos térmicos como aceites, silicatos, glicoles y líquidos similares con elevados puntos de ebullición se utilizan allí donde se demandan temperaturas

elevadas por necesidades del proceso pero a bajas presiones de trabajo. Estas necesidades incluyen secado de yeso, algodón, pintura y otros productos fabricados que previamente pueden haber sido conseguidos por calentamiento directo con gas natural. Las temperaturas de hasta 750 °F (400 °C) son prácticas con fluidos térmicos; un límite de 538 °C no queda demasiado alejado.

Donde pueden usarse sistemas HTHW, son preferidos a los líquidos térmicos, porque tienen cerca del doble de capacidad térmica, no se deterioran con el uso y son baratos.

Los sistemas de líquidos térmicos también son utilizados junto con sistemas de vapor. Las plantas que requieren vapor a alta presión para aplicaciones específicas y que pueden aplicar líquidos térmicos para otros usos también pueden instalar un intercambiador térmico líquido-vapor y usar parte de su producción para generar vapor. Esto elimina la instalación de una caldera separada calentada por gas o aceites de petróleo (gas-oil, fuel-oil, etc).

Cuando una sustancia orgánica está en estado líquido, la unidad calefactora se denomina de calentador, y si está vaporizada se llama vaporizador. El calentamiento puede llevarse a cabo en unidades calentadas eléctricamente hasta aproximadamente 250.000 kcal/hr, y para unidades por encima de esa cifra normalmente se calientan por gas, combustibles líquidos e incluso carbón. Las unidades calefactoras son generalmente compactas y de marcha automática hasta una capacidad máxima de 75 millones de kcal/hr. Como norma, para capacidades mayores se utilizan unidades múltiples.

Los sistemas utilizados pueden clasificarse como sigue:

1. Los sistemas de vapor son normalmente del tipo pirotubular usando retorno por gravedad o de condensado bombeado. Véase la Figura 4.3*b* de la página siguiente.
2. Los sistemas líquidos usan calderas de tubos de agua, bien con circulación natural o forzada, como se muestra en la Figura 4.3*a*. La Figura 4.4*a* de la página 139 muestra una caldera horizontal del tipo de tubos de agua helicoidales. El diseño, una vez más, de circulación forzada, se usa para las capacidades mayores.

Entre los fluidos orgánicos utilizados están: *Downtherm*, *Aroclor*, *Therminol*, *FR* y *Tetralin*, así como *Diphil*, de la casa Bayer®. Cada una de estas sustancias tiene propiedades similares, pero los detalles concretos deberán obtenerse de los fabricantes. Como muchos de ellos son hidrocarburos, un fallo o rotura de tubo puede crear peligro de incendio en la unidad. Algunos departamentos de las compañías de seguros de incendios requieren instalar un dispositivo antiincendio de vapor o gas inerte en la unidad para comprobar un posible incendio ante una fuga o pérdida de presión. Los controles de seguridad incluirán un dispositivo de corte por temperatura elevada, por presión elevada y un conjunto de válvulas de seguridad para presión máxima permisible en la unidad.

El *Dowtherm* es uno de los fluidos orgánicos más conocidos, y una revisión de algunas de sus características es como una revisión de las de otros fluidos orgánicos. En la Figura 4.4*d*, se notará que a una temperatura de 343 °C se produce una presión de *Dowtherm* de alrededor de 3,7 kg/cm^2. Para alcanzar esta temperatura con vapor saturado se necesitará una presión de 154 kg/cm^2. Los costos comparativos de fabricación de calderas para estas presiones son obvios.

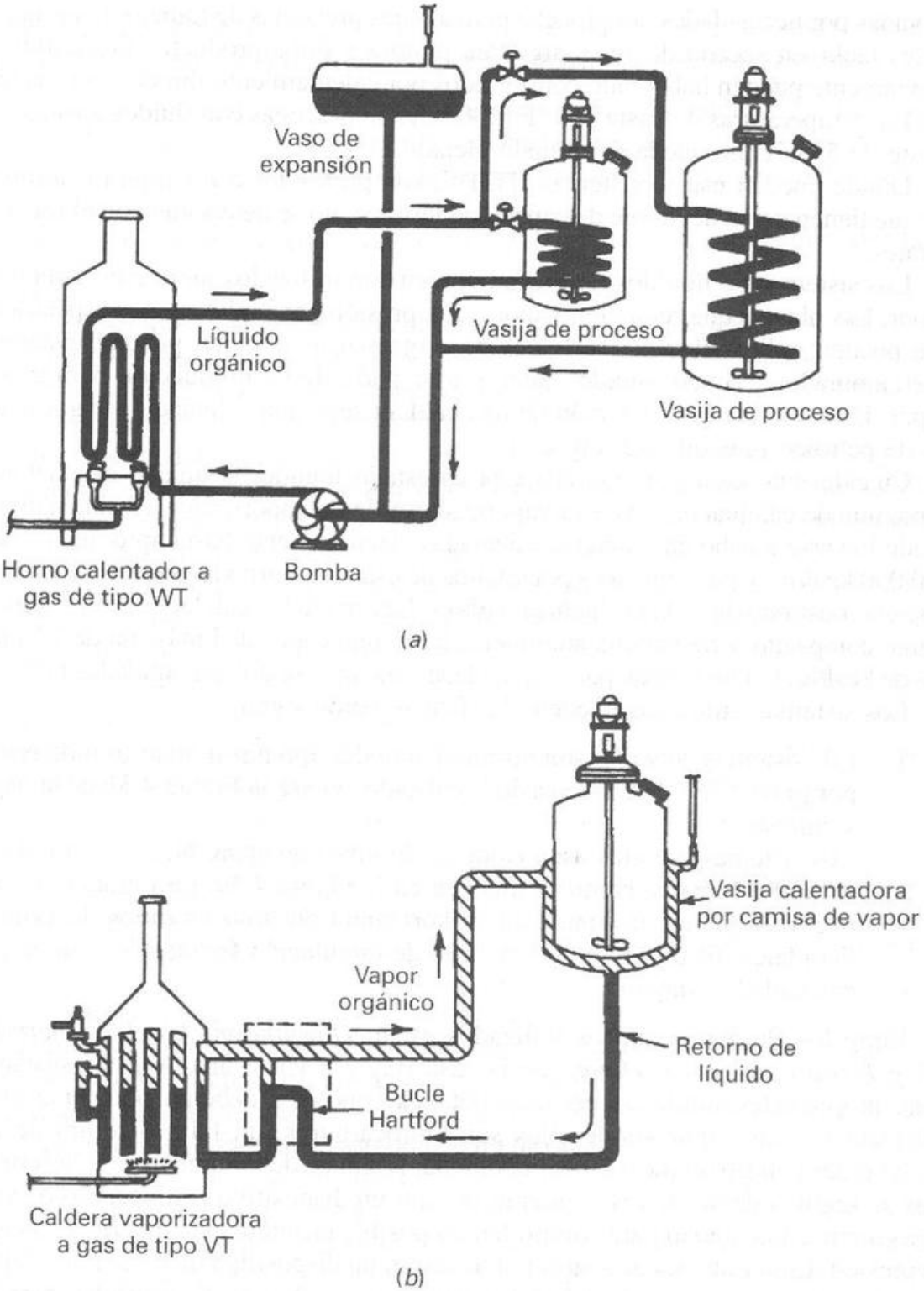
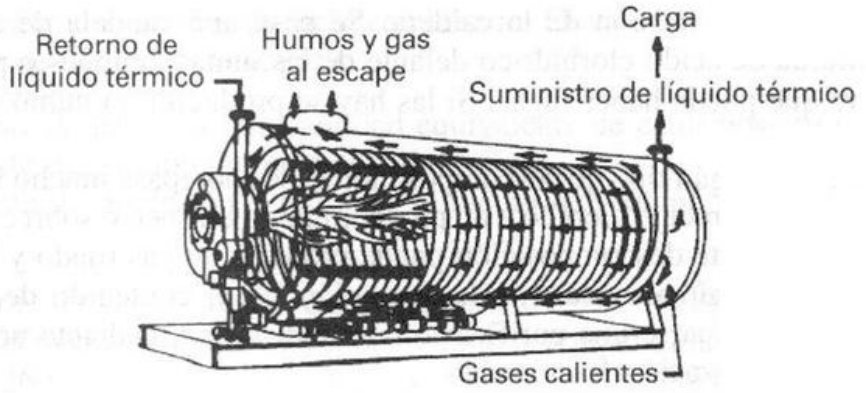


Figura 4.3. Calderas orgánicas. (*a*) Calentador de líquido con circulación forzada. (*b*) Caldera de vapor con retorno de condensado por gravedad. (*Cortesía de Dow Chemical Co.*)

El *Dowtherm* es una materia orgánica. El *Dowtherm A*, que hierve a 260 °C y está recomendado para temperaturas de hasta 400 °C, está compuesto por un 26,5 por 100



(*a*)

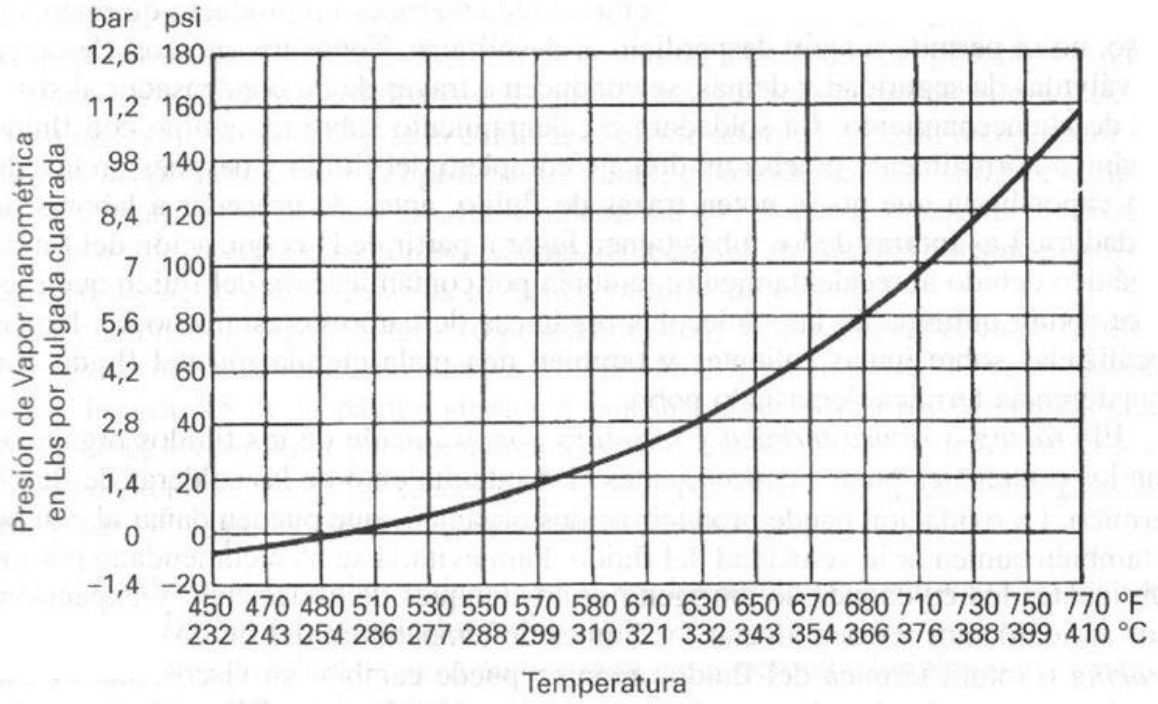


Figura 4.4. (*a*) La caldera de tipo serpentín calienta líquido orgánico hasta 5 millones de kcal/hora. (Cortesía de Power Magazine.) (*b*) Curva de presión-temperatura del vapor de *Dowtherm A*. (*Cortesía de Dow Chemical Co.*)

de difenilo y un 73,5 por 100 de óxido de difenilo. El *Dowtherm C* se usa sólo en fase líquida y para temperaturas hasta 427 °C. El *Dowtherm* no es tóxico.

Es más difícil mantener la estanqueidad de las juntas con *Dowtherm* que con vapor o agua, y así las juntas o uniones más adecuadas de las calderas son soldadas en vez de roblonadas y los tubos van soldados a los calderines. Mientras una prueba hidrostática bajo presión de agua fría puede descubrir fugas en defectos de una caldera de vapor, no habría indicación de pérdida o fuga más que con *Dowtherm* caliente. La prueba más satisfactoria para las calderas de fluido térmico *Dowtherm* es introducir amoníaco gas (NH_3) en el sistema a una presión de hasta 0,07 kg/cm^2 o llenar la caldera al 50 por 100 con agua amoniacal. Se aplica después aire a presión,

al 50 por 100 de la presión de la caldera. Se pasa una candela de azufre o una solución diluida de ácido clorhídrico delante de las juntas, uniones o puntos donde se considere que pueda haber fugas. Si las hay se producirá un humo blanco como resultado indicador.

Puede ocurrir algún tipo de descomposición si se sobrepasa mucho la temperatura recomendada de trabajo, debido a un procedimiento erróneo o sobrecalentamiento localizado. Semejante descomposición puede producir un gas fijado y trifenilos solubles que pueden airearse durante la operación. Si el contenido de trifenilos es excesivo, debe efectuarse una purificación del *Dowtherm* mediante un método por destilación o cristalización fraccionada.

En las calderas de *Dowtherm* se proveen conexiones de purga; pero se usan sólo cuando la caldera está fuera de línea y fría, para el vaciado de la caldera o para arrastrar líquido para purificación. Como el *Dowtherm* es un producto químico valioso, no se permite ningún desperdicio ni despilfarro. Todos los venteos, descarga de válvulas de seguridad y demás, se conducen a través de un condensador al sistema de almacenamiento. La soldadura o calentamiento sobre un equipo con fluido orgánico normalmente precisa un drenaje completo del fluido y después un lavado con vapor hasta que no se noten trazas de fluido, antes de proceder a labores de soldadura. Las roturas de los tubos tienen lugar a partir de la coquización del fluido orgánico debido al recalentamiento; también por contaminación del fluido que produce rotura química de las moléculas orgánicas de carbono; asimismo las llamas localizadas sobre juntas calientes y también una mala circulación del fluido con transferencia térmica demasiado pobre.

El *craking* o *rotura térmica* y la *rotura por oxidación* de los fluidos orgánicos son los principales puntos concernientes al mantenimiento de las calderas de fluido térmico. La oxidación puede producir ácidos orgánicos que pueden dañar al equipo y también aumentar la velocidad del fluido. Para evitarla se ha recomendado por los fabricantes los colchones de nitrógeno de los tanques de almacenaje y expansión. Los antioxidantes pueden afectar los límites de temperatura del fluido orgánico. El *craking* o rotura térmica del fluido orgánico puede cambiar su viscosidad, lo que puede afectar a las bombas produciendo cavitación. Los depósitos de coque del *craking* térmico pueden conducir a un sobrecalentamiento de los tubos. Algunos fluidos con base de petróleo han manifestado evitar la deposición de coque por formación de gránulos de carbono cristalino que no pueden adherirse a las superficies calientes. Los operadores deberían consultar con los suministradores de fluidos orgánicos sobre el tipo y fabricantes de tales productos si el fluido orgánico tiene que trabajar por encima de 700 °F (370 °C).

SISTEMAS DE CALOR PERDIDO, CICLO COMBINADO Y COGENERACIÓN

Calderas de calores perdidos. Hay numerosos procesos de fabricación que desprenden cantidades considerables de gases a temperaturas elevadas. Los más prominentes entre éstos son los gases de escape de turbinas como las que se usan en

plantas generadoras eléctricas de ciclo combinado. El valor de la recuperación térmica depende de tres consideraciones:

1. El coste de producir una cantidad equivalente de calor por otros medios.
2. El coste del equipo de recuperación.
3. El coste de operación y de mantenimiento del equipo de recuperación de calor.

Las calderas de vapor pueden diseñarse para utilizar el calor perdido como el total o parte del medio generador de vapor. Como la temperatura de los gases es normalmente de 260 °C a 590 °C, mientras los productos de combustión en la instalación calentada convencionalmente pueden entrar en los pasos generadores a 1.093 °C, deben utilizarse algunos medios de compensación. De otro modo, para tener una capacidad generadora de vapor apreciable, la caldera debería estar más allá de todo lo razonable en tamaño. Otros factores a considerar además de las presiones y temperaturas de los gases perdidos son las propiedades físicas y químicas del gas, su efecto en las diversas zonas de la caldera, el efecto sobre el sistema recuperador de calor de las perturbaciones del proceso de planta y consideraciones similares implicando la continuidad del servicio. La recuperación de calores de escape de los procesos industriales y equipo de combustión puede reducir a menudo el consumo total de combustible de la planta con una inversión mínima de capital.

La combustión suplementaria (o poscombustión) se usa cuando el calor perdido de los gases no tiene suficiente energía para producir la presión final de vapor deseada. La Figura 4.5 de la página siguiente muestra algunos calores o temperaturas típicas de gases perdidos y temperaturas normalmente disponibles de los procesos.

Dependiendo de las propiedades de los gases perdidos y de la presión/capacidad necesitada, se usan las siguientes calderas de recuperación:

1. Calderas pirotubulares, de ambos tipos, horizontales y verticales, si los gases están relativamente limpios.
2. Calderas de tubos de agua rectos, para gases perdidos limpios o moderadamente cargados de polvo.
3. Calderas de tubos de agua curvados (*Stirling*), para cargas muy polvorientas.
4. Calderas de circulación positiva, para gases limpios de baja temperatura.
5. Calderas presurizadas o supercargadas, para gases de escape de turbina (caldera tipo «Velox»). Utilizadas principalmente en Europa.

Como los gases perdidos muy a menudo tienen gases inertes y partículas sólidas atrapadas en la mezcla, deben considerarse materiales especiales y otros factores de diseño en la aplicación de una caldera de calor perdido. Estos factores de prácticas de operación de mantenimiento evitarán el tipo de rotura inesperado que puede ocurrir también en estas unidades. Entre los fallos y roturas posibles están los siguientes:

1. Roturas de tubos por acumulación de lodos y óxido, erosión de los tubos por los partículas de los gases y corrosión del material del tubo por el ataque químico del lado de los gases.
2. Masa de gases con contenido térmico elevado, produciendo el equivalente de un daño por sobrecalentamiento.

Tipo de gas	Temperatura, °F	Temperatura, °C
Proceso de oxidación de amoníaco	1.350-1.475	732- 802
Horno de recocido	1.100-2.000	593-1.093
Horno de cemento (vía seca)	1.150-1.500	621- 816
Horno de cemento (vía húmeda)	800-1.100	426- 593
Horno de reverbero de cobre	2.000-2.500	1.093-1.370
Escape de motor diesel	1.000-1.200	538- 649
Hornos de forja y caldeo de palanquilla	1.700-2.200	926-1.204
Escape de turbina de gas	850-1.100	454- 593
Incinerador de basuras	1.550-2.000	843-1.093
Horno abierto de fusión de acero soplado con aire	1.000-1.300	538- 704
Horno abierto de fusión de acero soplado con oxígeno	1.300-2.100	704-1.150
Horno básico de oxígeno	3.000-3.500	1.650-1.930
Horno de refinería petrolífera	1.000-1.100	538- 593
Proceso mineral sulfuroso	1.600-1.900	871-1.038
Horno de zinc	1.800-2.000	982-1.903

Figura 4.5. Gases de escape de procesos con temperaturas de salida disponibles de procesos industriales para generación de vapor.

3. Cegado de los pasos de gases por el lado de fuego, dando lugar a un sobrecalentamiento.
4. Mal funcionamiento de controles o equipos, produciendo unas condiciones de bajo nivel de agua, con daños en tubos y otros.

Un factor o condición a menudo despreciada en las calderas de vapor de calor perdido es la posibilidad de desarrollar una situación peligrosa de bajo nivel de agua (o de falta de agua) que, si no es detectada, puede producir fusión o quemado de los tubos en los casos de convección. Ésta es una consideración de diseño extremadamente importante. Es también una comprobación de trabajo muy importante que debería hacerse periódicamente para asegurar que la unidad está en condiciones de trabajo. Esta prueba debería ser la misma que cuando el corte de combustible o extinción de llama se producen en una caldera estándar. Básicamente el diseño debería incluir un mecanismo, ya sea una compuerta pesada o algún otro mecanismo de cierre rápido. De este modo, en caso de bajo nivel de agua, los gases de escape pueden cortarse en la caldera y hacer un *bypass* por la chimenea. Así el proceso básico no será interrumpido y la caldera será salvada de un serio daño por sobrecalentamiento.

Un método habitual es un dispositivo que automáticamente desvía los gases tan pronto como baja el nivel de agua a un nivel peligroso predeterminado. El tiempo es extremadamente importante en una situación de bajo nivel de agua, de modo que la entrada de calor debe interrumpirse rápidamente.

Las *plantas de ciclo combinado y cogeneración* están a veces agrupadas conjuntamente, pero necesitan definición. En una *planta de ciclo combinado,* un *prime mover* (primer motor), tal como una turbina de gas, acciona un generador eléctrico y los gases de escape de la turbina son dirigidos a una caldera de recuperación de calor, llamada generador de vapor por calor de recuperación o HRSH *(Heat Recovery Steam*

System), que genera vapor, y este vapor se dirige al segundo motor, una turbina de vapor que también acciona o arrastra un generador eléctrico. Este sistema combina así el ciclo de Brayton (turbina de gas) con el ciclo de Rankine sobre la turbina de vapor. *Cogeneración* es la generación simultánea de energía eléctrica con un subproducto que es el calor de proceso, o vapor para utilización en el proceso.

La planta de energía eléctrica de ciclo combinado usando turbinas de gas ha mostrado un crecimiento notable desde la crisis energética de 1973, debido a que el sistema ha aumentado el rendimiento energético de la planta térmica, ahorrando así combustible y también a causa de las mejoras de materiales y diseño en las turbinas de gas, que permiten mayor temperatura de trabajo y con ello mejor rendimiento. Las centrales están usando la tecnología del ciclo combinado para renovar viejas plantas con el turbogenerador de gas suministrando el calor de escape para hacer vapor que se destina a accionar viejos turbogeneradores de vapor (turbos).

La *cogeneración* de energía eléctrica y vapor para proceso ha sido estimulada por la legislación del gobierno federal PURPA *(Public Utility Regulatory Policies Act),* con que anima y estimula a obtener el máximo de energía de los combustibles por razones de conservación y ahorro energético. Los productores eléctricos independientes han conseguido vender electricidad a las centrales locales por la legislación PURPA y vender vapor a las plantas industriales próximas, o producir vapor para utilización propia y vender el excedente eléctrico a la central o compañía eléctrica local.

La Figura 4.6 de la página siguiente es una planta de cogeneración de ciclo combinado. Las unidades clave son dos turbinas industriales de servicio pesado, cada una de 40,5 MW a 65 °F (18,3 °C) de temperatura ambiente; dos calderas de calores perdidos cada una de 64.400 kg/hr, 63 kg/cm^2 y 482 °C de temperatura del vapor; una sección de media presión a 4,2 kg/cm^2 produce un total de 22.680 kg/hr de vapor; y una sección a 0,7 kg/cm^2 produce vapor para el desaireador. El vapor a 63 kg/cm^2 se envía a un turbogenerador de vapor único tarado de 9,6 a 31,6 MW sin extracción de vapor 42 kg/cm^2. Los gases del escape de la turbina entran a una caldera de recuperación a 990 °F (532° C) y salen de la chimenea a 276 °F (135,5 °C).

Un sistema de control distribuido regulará automáticamente todos los sistemas de la planta, excepto las turbinas de gas y vapor, que tienen sus propios controles. Sin embargo, el esquema de control integrado monitoriza el rendimiento de las turbinas para integrarlos en la red automática principal.

Las calderas del tipo de tubos de agua (véase la Figura 4.7 de la página 145) se usan en plantas de ciclo combinado, como se muestra en la Figura 4.6. Dependen de grandes superficies de transferencia térmica por convección, ya que no hay un hogar que suministre calor radiante. La combustión suplementaria o poscombustión se usa en las grandes plantas de cogeneración durante las demandas punta de vapor, con quemadores en vena o conducto colocados entre las turbinas de gas y las calderas.

Las calderas de recuperación de gases perdidos (HRSG) normalmente emplean un quemador de conducto para elevar la temperatura del escape de la turbina de gases, y así aumentar la producción de vapor, como se precisa durante los períodos punta de demanda de carga. Las consideraciones de diseño de la envolvente o *casings* de la caldera limitan la temperatura máxima de los gases después del quemador de conducto a aproximadamente 927 °C, para evitar alabeos del material de cierre y recubrimiento que pudieran producir problemas de estanqueidad.

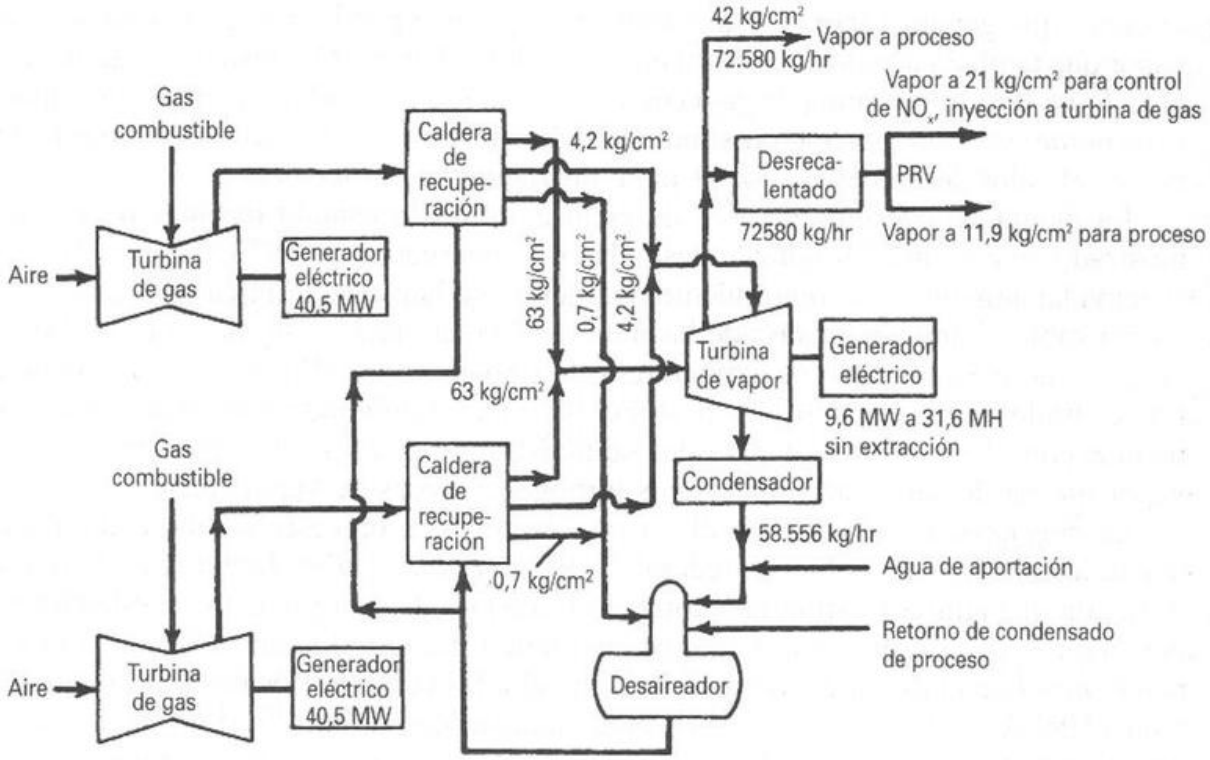


Figura 4.6. Planta de cogeneración en ciclo combinado con dos turbogeneradores de gas y dos calderas de recuperación de calores perdidos o HRGS*. La planta es capaz de generar hasta 112,6 MW de energía eléctrica y también suministra 45.360 kg/hr de vapor a 42 kg/cm².

Se utilizan los tubos de acero verticales y esto promueve la circulación natural a medida que se forman las burbujas de vapor y después suben hasta el calderín de vapor. También se utilizan tubos aleteados para suministrar unas superficies de transferencia térmica mayores en las calderas de recuperación (HRSG). Como se ve en la Figura 4.7, a medida que la planta de ciclo combinado ha crecido en tamaño, las calderas de recuperación de varias presiones se han ido desarrollando para suministrar vapor a las turbinas de vapor (primer motor de la cogeneración), pero también para cumplir los requerimientos de vapor de baja presión en la planta o para usos de proceso.

Las plantas de ciclo combinado deben cumplir con las normas jurisdiccionales de emisiones sobre descargas de CO y NO_x a la atmósfera. Se usan varios métodos, uno de los cuales es la inyección de vapor en la turbina de gas para bajar la temperatura de los gases. Este vapor también viene de la caldera de recuperación: se ha trabajado mucho sobre ello para mejorar el rendimiento de la planta de ciclo combinado. Una de las direcciones ha sido la conversión del carbón en gas bajo presión para quemarlo en la turbina de gas.

Otro tema es el *ciclo Cheng*. Este ciclo inyecta vapor en la turbina de gas después de que el vapor está sobrecalentado para incrementar el rendimiento eléctrico.

---

* *N. del T.:* En España a las calderas de recuperación de gases, que en EE. UU. se denominan abreviadamente como HRGS, las denominamos también en abreviatura CR. Es también otra abreviatura, en EE. UU., el término PRV (válvula reductora de presión o *pressure reducing valve*).

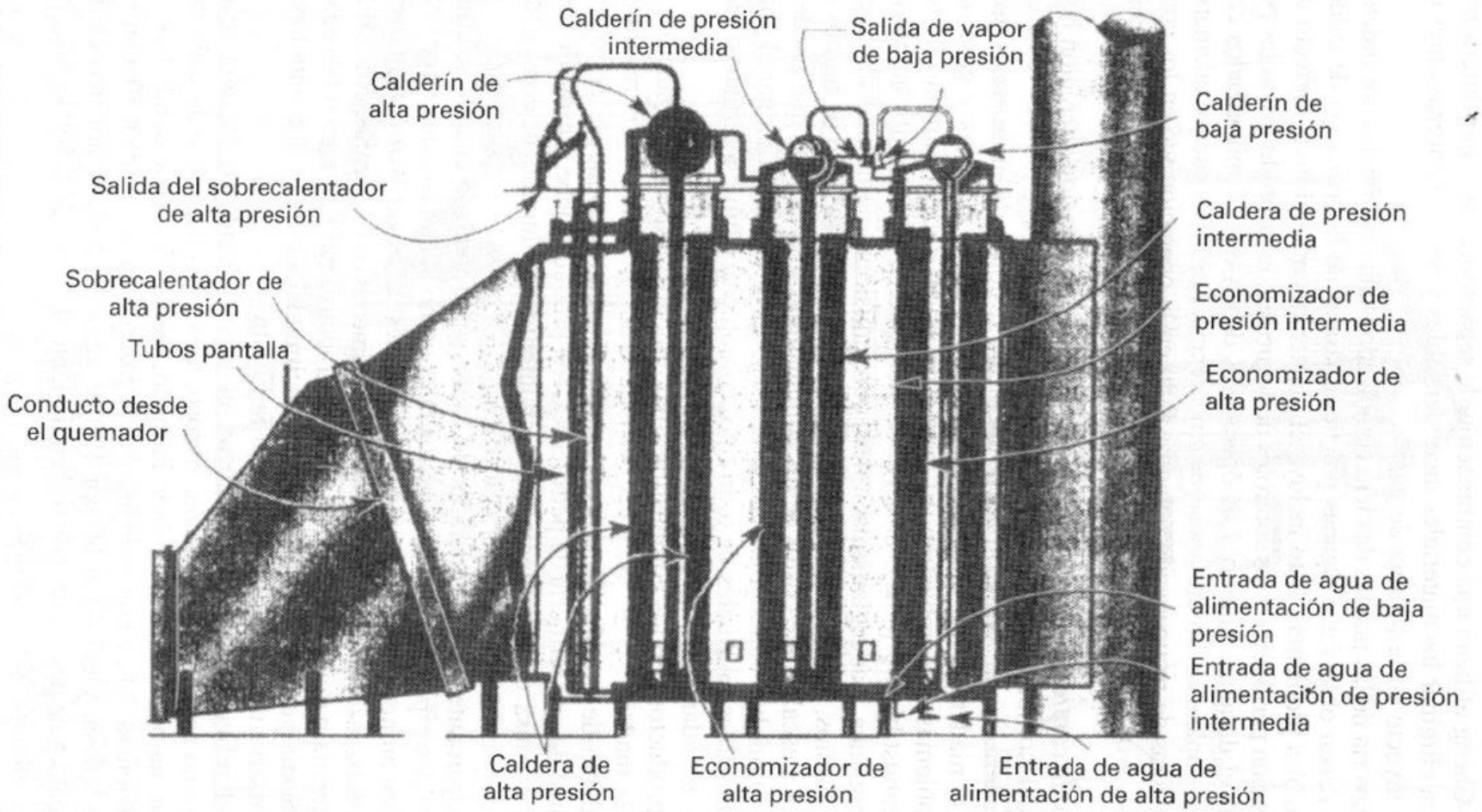


Figura 4.7. La caldera de recuperación de gases de escape en las plantas de ciclo combinado han aumentado en producción y generan vapor a varias presiones para el turbogenerador de la planta, para inyección de vapor en la turbina de gas y para otros usos o consumos de planta. (*Cortesía de Power magazine.*)

Esto requiere pureza del vapor en el rango de ppb (partes por billón). Las unidades del ciclo Cheng utilizan una combinación de separadores de vapor interiores y exteriores para eliminar los materiales incondensables y otras impurezas antes de que el vapor se inyecte en la turbina de gas.

La mayoría de las plantas de ciclo combinado están controladas por ordenador. Sin embargo deben observarse algunas prácticas básicas de la operación de calderas para evitar posibles problemas. Esto incluye el mantenimiento del nivel correcto de agua y comprobación periódica de los controles de seguridad, incluyendo los cortes por seguridad de nivel de agua mínimo. Los operadores deben estar familiarizados con las estrategias a emplear en circunstancias de emergencia. Los tubos pueden quemarse o fallar en las calderas de recuperación debido a fallo en la operación y/o en los controles de seguridad, y quizás a la confusión del operador cuando sobreviene el accidente.

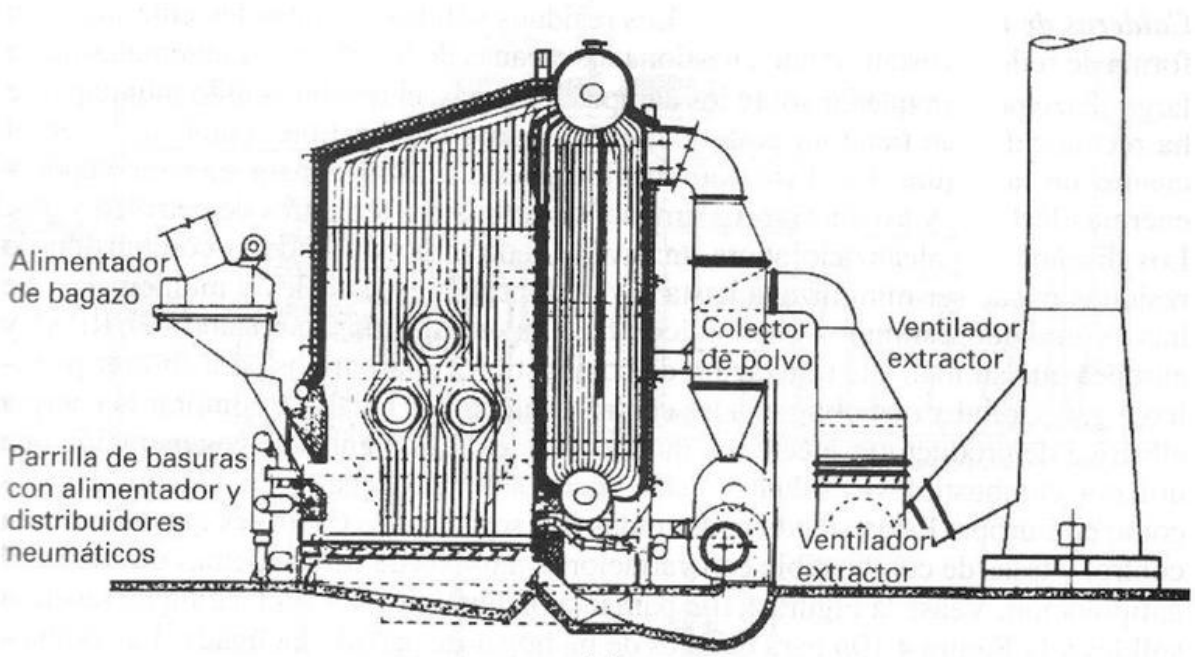
Calderas de combustibles residuales. Deben tomarse en consideración las características del combustible cuando se utilizan muchos combustibles residuales tales como madera, serrín, virutas, papel, muebles y residuos de industrias similares que utilizan la madera como material básico. Los residuos líquidos y gaseosos tienen otros problemas de combustión. El diseño del hogar debe ser amplio de forma que estos combustibles residuales ardan eficientemente en él, sin emitir humos ofensivos por la chimenea. Las reglamentaciones sobre emisiones permitidas ahora gobiernan muchos diseños, incluyendo que la caldera sea del tipo de tubo de humos o de tubo de agua. La escalada de costos de los combustibles y la escasez que puede sobrevenir en el futuro han conducido a las industrias y gobiernos a examinar el potencial de los combustibles residuales de todo tipo, como combustible alternativo para un suministro abundante de combustibles, como los aceites y el gas.

Subproductos sólidos combustibles hay muchos. Entre ellos están los desperdicios de la madera, serrín, hollejos del café y nueces, maíz y sus residuos, bagazo (subproducto de la caña de azúcar), carbón vegetal y coque de petróleo (residuo sólido final de una refinería de petróleo). Cada producto debe ser tratado de un modo especial a causa de las diferencias de contenido de humedad, consistencia, peso específico y contenido o poder calorífico.

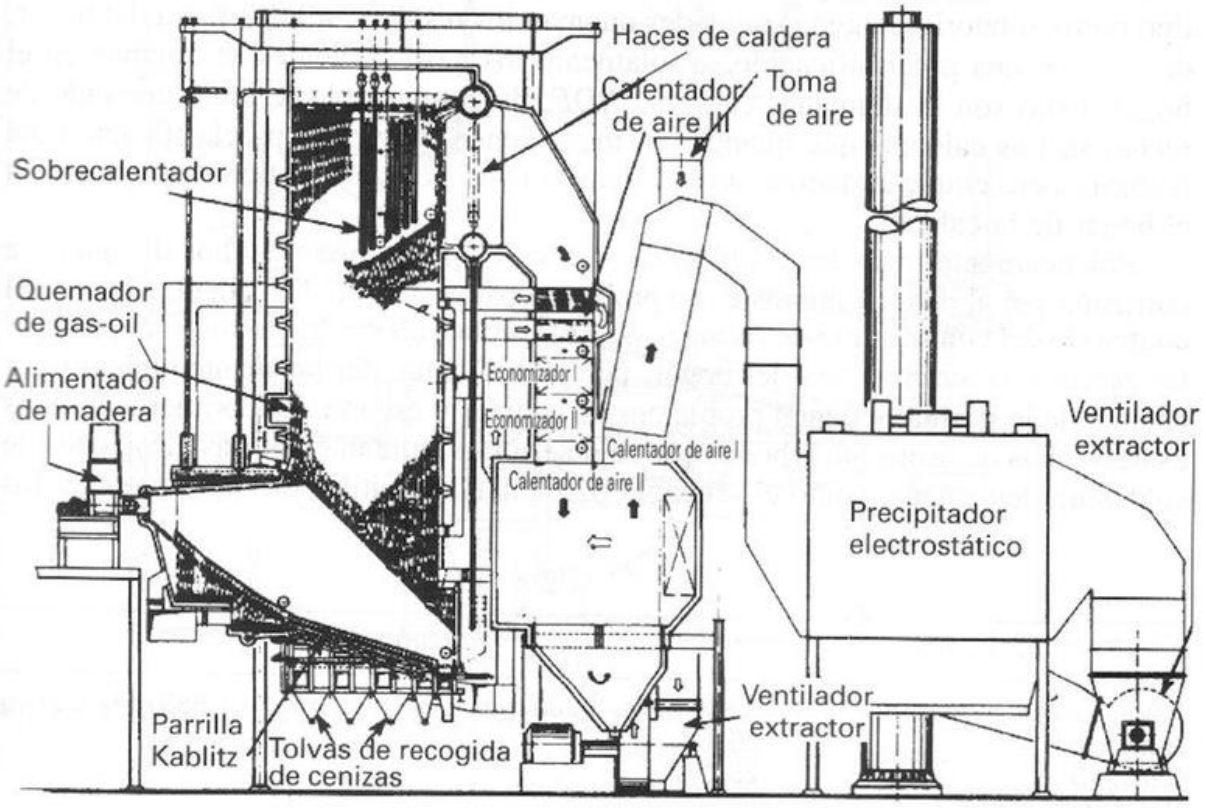
El hogar, antes que el generador de vapor, se ve afectado cuando se utilizan estos combustibles especiales. Los productos tales como el bagazo, que tiene cerca del 50 por 100 de humedad, requiere un hogar holandés. El hogar *Ward* es un diseño popular para el bagazo tanto en Estados Unidos como en otros lugares. Aquí el bagazo se seca y quema parcialmente en celdas de refractario bajo un arco o bóveda radiante. La combustión de los gases se completa encima del arco. Los alimentadores Stocker pueden usarse también como se ve en la Figura 4.8*a*.

En el refino de la caña de azúcar, el jugo obtenido de la caña se procesa y convierte en azúcar. El remanente fibroso, tenaz y voluminoso de caña machacado se denomina bagazo. Está también húmedo. Dependiendo de dónde haya crecido y de la eficiencia del extractor de jugo, el bagazo contiene entre un 30 a un 50 por 100 de fibra leñosa, y del 40 al 60 por 100 de agua. El poder calorífico es de 4.490 a 4.850 kcal/kg de peso seco, con un rendimiento de cerca de 2.500 kcal/kg con 45 por 100 de contenido de humedad.

La Figura 4.8*b* muestra una caldera que quema una combinación de recortes de madera y combustible líquido petrolífero (gas-oil o fuel-oil).



(*a*)



(*b*)

Figura 4.8. (*a*) Caldera de tubos de agua quemando bagazo con alimentador de basuras tipo «stoker» y quemadores auxiliares de combustible líquido; capacidad: 45.360 kg/hr, a 24,5 kg/cm^2. (*Cortesía de Riley Corp.*) (*b*) Caldera de combustible combinando madera y combustible líquido; genera 144.000 kg/hr de vapor con madera, y 215.900 kg/hora con combustible líquido a 65 kg/cm^2 y 460 °C. (*Cortesía de Gotaverken Energy Systems Inc.*)

Calderas de residuos energéticos. Los residuos sólidos municipales enterrados en forma de rellenos están siendo cuestionados a causa de los efectos ambientales que a largo plazo pueden quedar sobre los campos. Además, el residuo sólido municipal se ha reconocido que tiene un poder calorífico como combustible, como se ve en el cuadro de la Figura 4.9. Este combustible puede utilizarse para generar vapor y energía eléctrica, y así ahorrar los limitados suministros terrestres de petróleo y gas. Los diseños han alcanzado ahora un nivel donde la polución de la combustión de residuos puede ser minimizada hasta niveles aceptables estatales y municipales. Se han promovido estímulos económicos bajo la legislación americana (PURPA) y europea que animan a la utilización de combustibles alternativos para ahorrar petróleo y gas natural y que obligan a las centrales eléctricas locales a comprar la energía eléctrica de productores eléctricos independientes. Las plantas de cogeneración que utilizan combustibles residuales están incrementándose tanto en Estados Unidos como en Europa. Están siendo construidas con sofisticados controles que incorporan control y tasas de combustible con variaciones amplias de carga además de controles antipolución. Véase la Figura 4.10*a* para una planta típica de combustión de residuos sólidos y la Figura 4.10*b* para detalles de un hogar de parrilla inclinada. La combustión de los residuos sólidos se hace mediante parrillas inclinadas o por combustores tipo horno rotatorio. Algunas unidades queman los residuos sólidos fuera del hogar, después de una preclasificacion, y solamente los gases calientes se queman en el hogar. Éstas son las llamadas *calderas RDF* (de combustible residual derivado de rechazo). Las calderas que queman en masa tienen muy poca preclasificación del rechazo, pero emplean quemadores de lanzamiento con combustión del rechazo en el hogar de la caldera.

Prácticamente todas las calderas de rechazos son del tipo de tubos de agua. La corrosión por el lado de humos es un problema para este tipo de caldera, a causa del contenido del combustible de rechazo. Se utilizan ladrillos refractarios para proteger las zonas más susceptibles del hogar, pero éstos requieren un mantenimiento por encima de lo normal y tienen problemas de cenizas y escoria. Los primeros diseños usaron tubos de acero al carbono, que se deterioran rápidamente. Las aleaciones de soldadura depositada, como el «Inconel 625», han sido utilizadas para proteger los

Propiedad	Valor medio
Poder calorífico superior	3.800 mín ÷ 5.200 máx BTU/lb ≡ 2.111 ÷ 2.888 máx kcal/kg
Humedad	20 %
Carbono	25,2 %
Hidrógeno	3,5 %
Oxígeno	22,3 %
Azufre	0,1 %
Sólidos inertes	28,3 %
Densidad, en granel lb/yd^3, kg/m^3	270 ÷ 875 lb/yd^3 ≡ 518,43 kg/m^3

N. del T.: 1 yd^3 = 0,7645549 m^3.

Figura 4.9. Propiedades típicas de los residuos sólidos municipales. (*Cortesía de Power magazine.*)

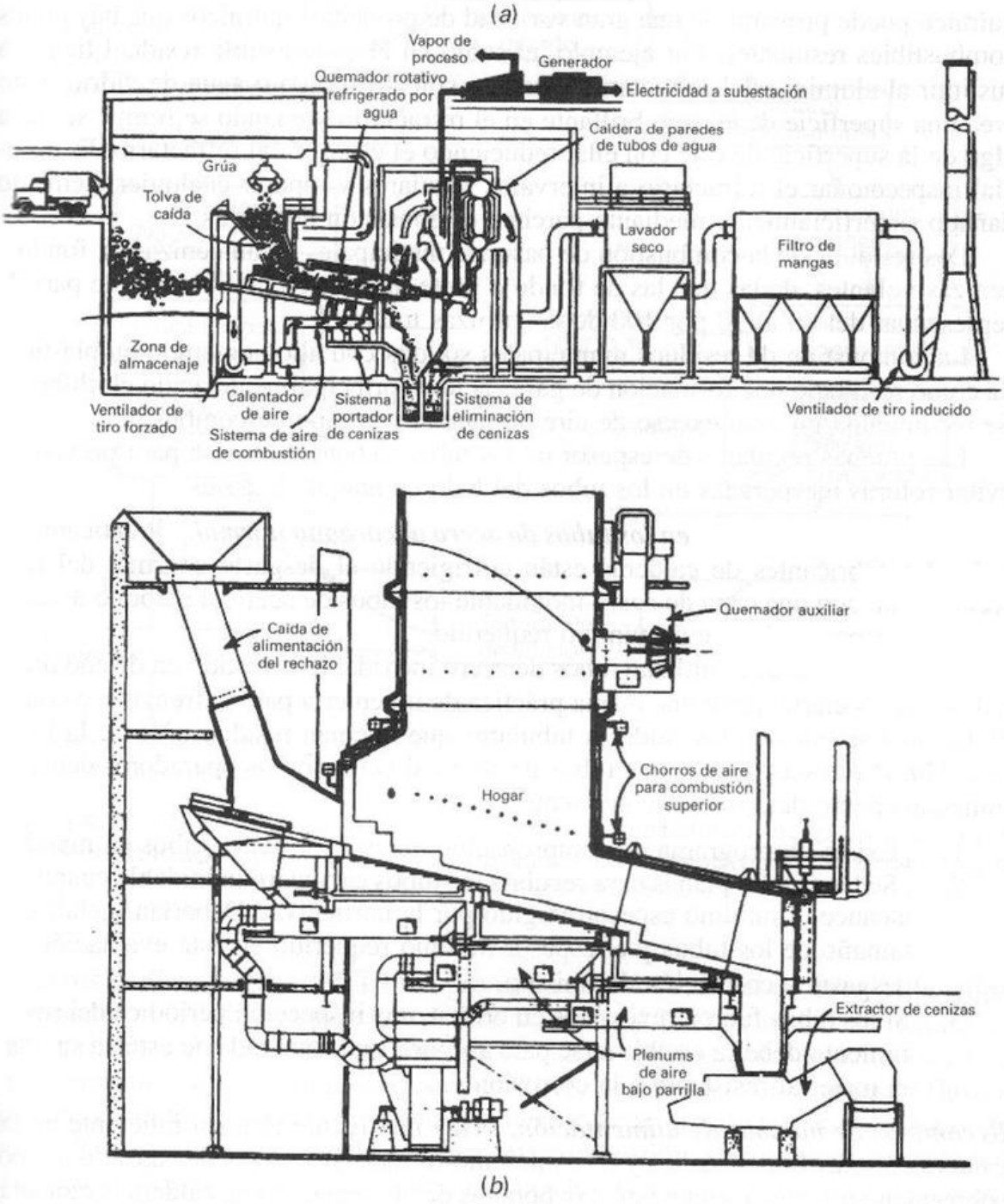


Figura 4.10. (*a*) Planta incineradora de residuos municipales con caldera de combustión en parrila inclinada. (*b*) Detalles de un hogar y parrilla para quemar residuos municipales. (*Revista de Ingeniería Mecánica, diciembre, 1988.*)

tubos de acero al carbono, mientras el «Inconel 825» está siendo utilizado en las zonas de gases a temperatura elevada.

El mantenimiento del refractario está por encima de lo normal en calderas que queman residuos debido al gran desgaste o erosión de los tubos de acero al carbono, que también está influido por los ciclos de temperatura y por el ataque químico. Cada calentamiento desde el frío produce dilataciones entre el refractario y la chapa de alojamiento y esto puede producir choques térmicos en el refractario. El ataque

químico puede provenir de una gran variedad de productos químicos que hay en los combustibles residuales. Por ejemplo, el sodio en el combustible residual tiende a sustituir al aluminio del refractario y formar silicato sódico o agua de vidrio. Esto crea una superficie de escoria brillante en el refractario y cuando se rompe se lleva algo de la superficie de éste con ella, reduciendo el espesor del refractario. Es esencial inspeccionar el refractario a intervalos regulares y reparar cualquier elemento dañado superficialmente mediante parcheo o reposición de piezas.

Los residuos de la combustión de basuras municipales crean cenizas de fondo y cenizas volantes, de las que las de fondo o parte inferior en las calderas de parrilla representan del 80 al 90 por 100 de las cenizas totales.

La combustión de residuos municipales sólidos con alto contenido en plásticos da como resultado una formación de gases ácidos, principalmente ácido clorhídrico. Se recomienda un gran exceso de aire al quemar este tipo de combustible.

Las pruebas regulares de espesor de los tubos deben efectuarse para prevenir y evitar roturas inesperadas en los tubos del lado de ataque de gases.

Modificaciones a realizar en los tubos de acero al carbono normal. Prácticamente todos los fabricantes de calderas están corrigiendo el desgaste anormal del tubo recubriendo con una capa de acero inoxidable los tubos de acero al carbono después de que el espesor alcance el mínimo requerido.

Algunos fabricantes utilizan tubos de acero inoxidable revestido en diseño original, y esto es ciertamente una buena práctica de ingeniería para enfrentarse a condiciones ambientales en las calderas tubulares que queman residuos. Véase la Figura 3.24*a*. Para estas plantas con tubos de acero al carbono, los operadores deberían inmediatamente determinar lo siguiente:

1. ¿Existe un programa de comprobación de espesor de los tubos en marcha?
2. ¿Se han hecho planes para recubrir los tubos con acero inoxidable cuando se alcance el mínimo espesor exigido por la normativa? Deberían incluirse el tamaño de los tubos y el espesor mínimo requerido en esta evaluación del desgaste y corrección del mismo.
3. Si los tubos fueron revestidos en origen, una inspección periódica del revestimiento debería establecerse para asegurarse de que todavía está en su lugar el material resistente a la corrosión.

Recambios de bombas de alimentación. Hay una fuente térmica inherente en las calderas de parrilla y barrotes y revestimiento refractario que puede causar daño por sobrecalentamiento si solamente hay bombas de alimentación de caldera accionadas eléctricamente y la energía eléctrica se interrumpe.

La ASME recomienda como recambio o repuesto bombas de alimentación accionadas por vapor o inyectores para las calderas alimentadas por «stoker» o alimentadas por otros métodos, cuyos hogares contengan grandes cantidades de refractario o que puedan tener o acumular grandes cantidades de escorias en el asiento del hogar. La bomba accionada por vapor se requiere incluso si existe repuesto de bombas accionados eléctricamente, a no ser que exista en el lugar una fuente de alimentación eléctrica auxiliar completamente independiente. El propósito de estas prácticas recomendadas es evitar el recalentamiento de la caldera por falta de suministro eléctrico, en aquellas calderas con grandes cantidades de calor latente almacenado en alimentadores, refractarios o escorias calientes en la zona del hogar.

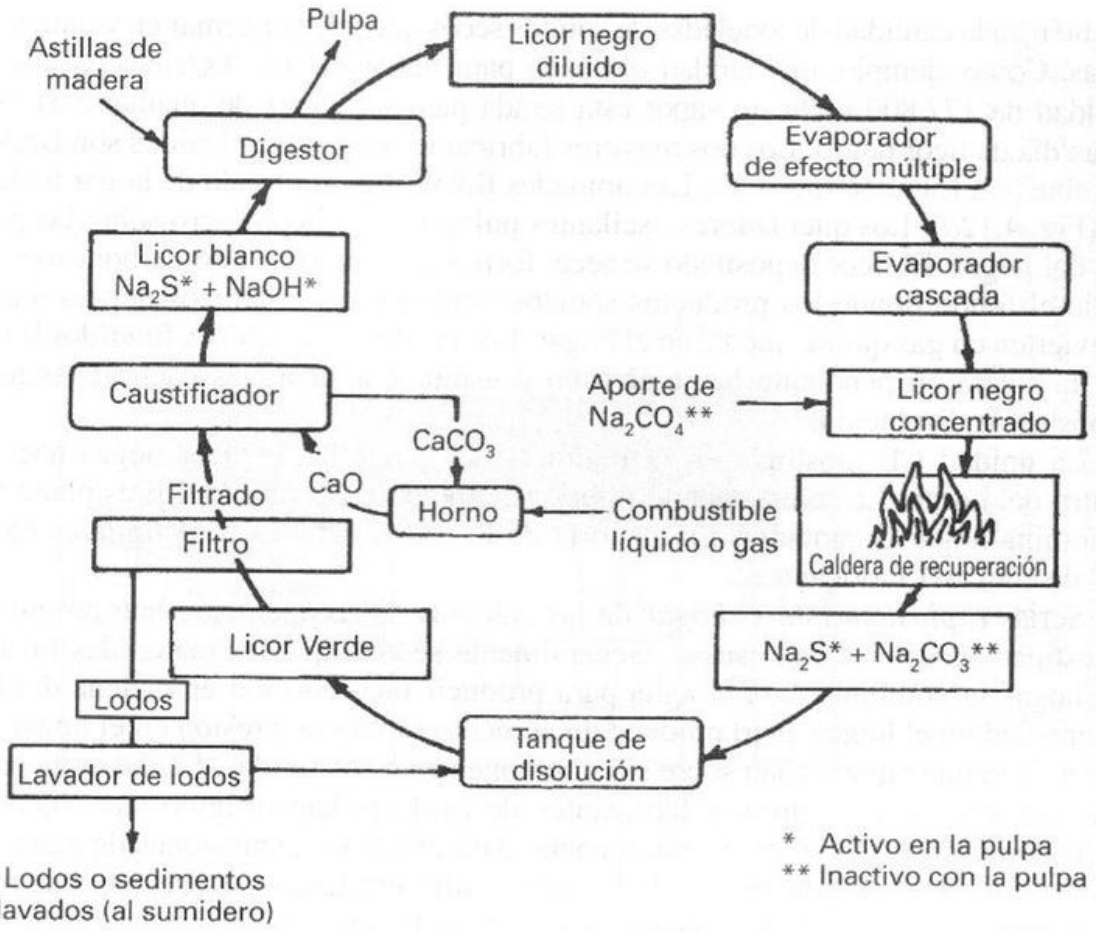


Figura 4.11. El ciclo «Kraft» de recuperación en papeleras recupera productos químicos utilizados para romper las fibras en los digestores quemando el licor negro en una caldera de recuperación.

Calderas de licor negro. El licor negro es un subproducto del proceso de la pulpa de madera en la industria papelera. Véase la Figura 4.11. Las astillas de madera se calientan mediante vapor en una solución de sulfito sódico e hidróxido sódico en un gran depósito conocido como «digestor». El licor concentrado en el digestor fluye a un tanque de almacenamiento donde se une al licor diluido de las lavadoras de pulpa. Para que este licor pueda sostener una combustión, se concentra después por evaporación y se le añade la torta de sales machacadas hasta que contenga más del 58 por 100 en sólidos.

El licor concentrado se bombea a aproximadamente 104 °C a través de quemadores oscilantes que lo pulverizan hacia las paredes del hogar; los restos de combustible carbonizando se acumulan hasta que son demasiado pesados para caer al suelo o solera del hogar, donde la combustión se ve asistida por toberas de aire primario. Los gases y un pequeño porcentaje de partículas alcanzan la parte superior del hogar donde se admite aire secundario hasta completar el proceso de combustión.

Un porcentaje considerable de productos químicos en forma de cenizas sódicas se recupera de las cenizas de este proceso. Así, la combustión de este licor negro es doblemente productiva, es decir, generación de vapor y recuperación de cenizas sódicas. La capacidad de una caldera de recuperación de licor negro se expresa

también en la cantidad de toneladas de sólidos secos que puede quemar en veinticuatro horas. Como ejemplo, una unidad diseñada para trabajar a 112 kg/cm^2 con una capacidad de 177.800 kg/hr de vapor está tarada para ser capaz de quemar 800 toneladas/día de licor negro. Los dos mayores fabricantes en Estados Unidos son B&W y Combustion Engineering (CE). Las unidades B&W usan un fondo de hogar inclinado (Fig. 4.12*a*). Los quemadores oscilantes pulverizan el licor negro sobre las paredes del hogar. El licor depositado se seca, forma un conglomerado carbonoso y cae hacia el fondo donde los productos sódicos funden y los orgánicos del residuo se convierten en gas que se quema en el hogar. Los productos químicos fundidos fluyen por la solera en pendiente hacia el caño o espita y a su través caen al tanque o depósito de disolución.

La unidad CE mostrada en la Figura 4.12*b* pulveriza el licor negro hacia el centro del horno. La solera o parte inferior del hogar en la unidad CE es plana y se denomina hogar decantador. La mayoría de los otros detalles son similares en los dos diseños del fabricante.

Serias *explosiones en el hogar* de las calderas de recuperación han propiciado investigaciones sobre sus causas. Generalmente se cree que los materiales fusibles del hogar se combinan con el agua para producir una reacción en cadena del tipo detonación en el hogar. Esto produce un aumento rápido de presión en el hogar con ondas de choque que actúan sobre sus componentes estructurales. La industria papelera, compañías de seguros y fabricantes de calderas han dirigido sus objetivos, incluyendo procedimientos de emergencia, para evitar las explosiones de agua-materiales fundibles. La integridad de los tubos sufre tensiones y esfuerzos y se recomiendan inspecciones de las soldaduras por procedimiento NDT (no destructivo) en toda la zona del hogar, así como la monitorización de la concentración del licor negro. Entre los procedimientos recomendados está el drenaje rápido de la caldera a un nivel de 2,44 metros por encima del punto más bajo del suelo del hogar en cualquier momento que se sospeche que está entrando agua en la zona del hogar.

Los operadores de las calderas de licor negro tienen que estar seguros de que todas las bombas de licor negro se cierran simultáneamente cuando se inicie el procedimiento de emergencia del drenaje rápido, de otro modo puede resultar un incendio importante. Las industrias papeleras, compañías de seguros y fabricantes de calderas han formado un comité asesor de calderas de recuperación de licor negro (BLRBAC) para desarrollar e implementar los procedimientos de instalación, inspección y mantenimiento de estos tipos de calderas y para hacer que los operarios llegen a estar completamente familiarizados con estas líneas maestras y procedimientos. Otra organización activa en el desarrollo de programas de auditoría y seguridad es el instituto americano del papel. Los equipos de las diferentes compañías visitan los lugares de situación de estas calderas para tomar buena nota de si se están siguiendo prácticas no seguras en el trabajo, mantenimiento e inspección de las calderas de recuperación de licor negro. Los puntos sobre los que se hace hincapié son la seguridad personal; integridad de las partes sometidas a presión, lo que incluye materiales, soldaduras, comprobación de la corrosión y erosión por métodos visuales y NDT; programas de tratamiento de agua; cumplimiento de las recomendaciones BLRBAC, incluyendo las últimas recomendaciones; sistemas de enclavamiento y seguridad y diseños a salvo de fallos recomendados e implementados y la comprobación de estos dispositivos; procedimientos de operación de emergencia

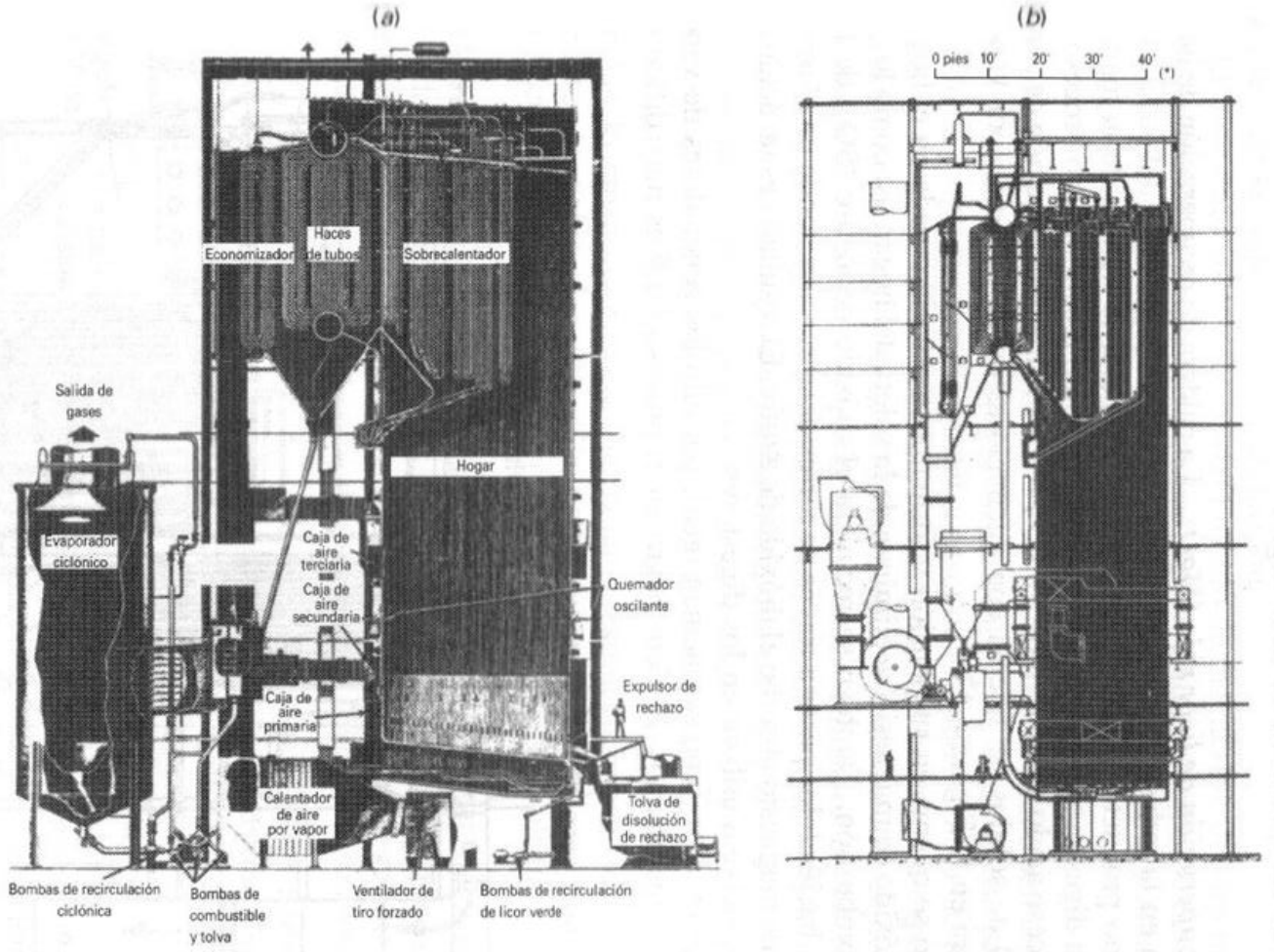


Figura 4.12. Dos tipos de calderas de recuperación de licor negro (lejía negra). (*a*) La caldera de licor negro B&W tiene el fondo del hogar inclinado hacia el tanque de disolución y recogida de rechazo fusible (fundido). (*Cortesía de la Cía. B&W.*) (*b*) Las características de la caldera CE (Combustion Engineering) son que tiene el fondo de hogar (solera) plana, siendo el combustible pulverizado y proyectado hacia el centro del hogar para su combustión mediante quemadores oscilantes. (*Cortesía de la Cía. Combustion Engineering.*)

que están en vigor en cada situación; programas de entretenimiento existentes para los trabajadores de la caldera de licor negro; programas de mantenimiento que están siendo aplicados a las calderas de recuperación de licor negro y el historial operativo y de fiabilidad de la situación.

El propósito de los programas BLRBAC y API es evitar las pérdidas por daños a la propiedad y a las personas que puedan suceder a consecuencia de las explosiones de las calderas de recuperación de licor negro.

Calderas de recuperación de licor rojo (MgO). La caldera de recuperación de licor negro se utiliza en la industria papelera cuando se utiliza el proceso del sulfito (de hidrógeno) como producto químico para romper o separar la lignina de la madera que se cuece en digestores. El proceso se considera como alcalino. Otro proceso se denomina «proceso ácido de licor rojo». El licor rojo con una concentración de cerca del 50 por 100 de sólidos, se quema con quemadores de atomización por vapor, como se muestra en la Figura 4.13.

El licor rojo se quema en suspensión y forma poca escoria o nada en el hogar. Las cenizas de óxido de magnesio se eliminan de la solera del hogar, así como los de los gases de combustión. También se recupera el dióxido de azufre (SO_2) de los gases o humos, haciéndolos pasar a través de torres de absorción donde un *slurry* o caldo de óxido de magnesio absorbe el dióxido de azufre. El resultado es un ácido de cocción que se vuelve a utilizar en los digestores.

El licor negro y el rojo no se queman igual; por ello los generadores de vapor utilizados no son los mismos. El licor negro en el proceso *kraft* es muy difícil de.

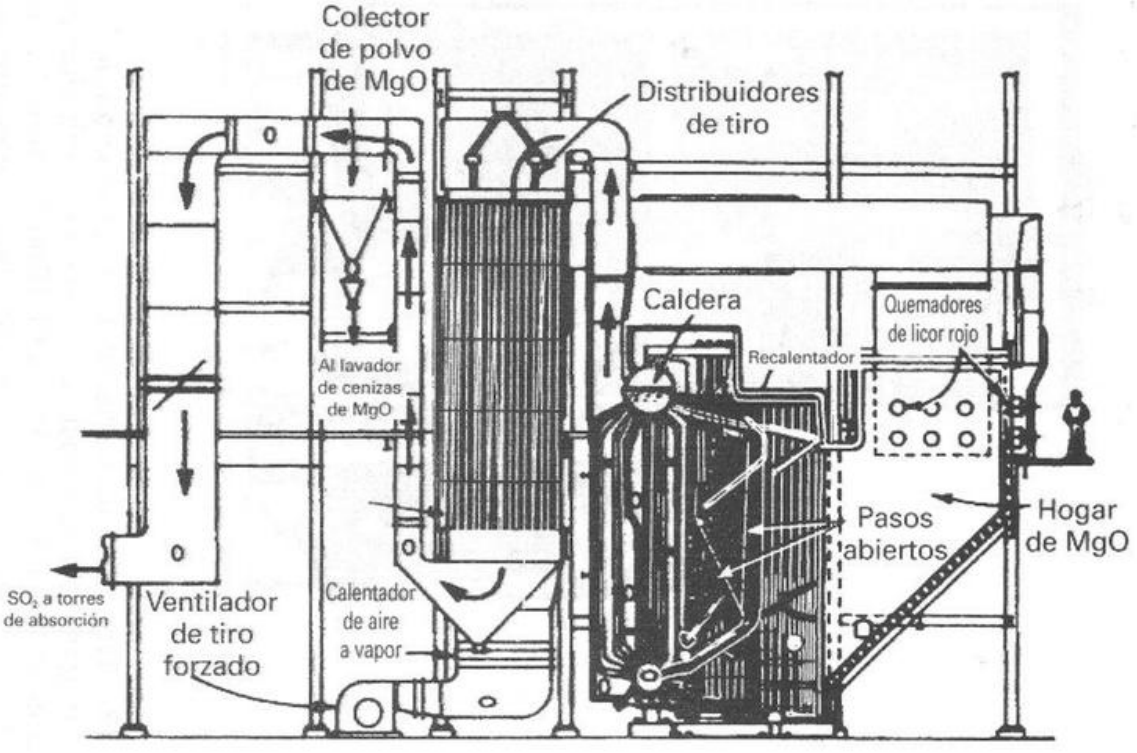


Figura 4.13. Caldera de tubos de agua para quemar licor rojo utilizada en el proceso de recuperación química y generación de vapor en la industria papelera. (*Cortesía de Power magazine.*)

quemar. Se necesitan grandes hogares para mantener la temperatura relativamente baja, porque el licor tiene un contenido de cenizas de baja temperatura de fusión muy elevado. Deben mantenerse colectores de material fundido sobre la solera refractaria en pendiente y asimismo una atmósfera reductora en la parte inferior del hogar para la conversión y proceso químico. También, como las superficies del recalentador y caldera tienen tendencia a revestirse de escoria, trabajan con bajas tasas de intercambio térmico. De ese modo, es necesario un soplado frecuente y limpieza de las superficies de calefacción.

El licor rojo en el proceso MgO (óxido de magnesio), de otro modo, se quema completamente en suspensión, haciendo poca o ninguna escoria. De este modo pueden utilizarse generadores de vapor más pequeños para una producción de vapor equivalente.

Corrosión del lado hogar (fuego). La corrosión y la erosión son un problema continuo en las calderas de recuperación de licor negro. La industria papelera ha establecido un programa de pruebas del espesor de los tubos a causa del riesgo inherente de que la rotura de un tubo permita entrar agua en el hogar y así exponer la unidad a una reacción química productos fundidos-agua y a una posible explosión del hogar. Los tubos extruidos de composite están siendo utilizados en las nuevas calderas como se ve en la Figura 3.24*a*. Finalmente, cuando es inminente el mínimo espesor de pared, los tubos viejos se recubren con una capa de material metalizante del tipo del acero inoxidable. Se requieren todavía inspecciones periódicas para determinar las condiciones del revestimiento o del placado metálico.

Se utiliza la emisión acústica para alertar a los operadores de una rotura o fallo tubular, lo mismo que existen termopares estratégicamente localizados, especialmente en los sobrecalentadores del tipo colgante, que requieren atención para asegurar la circulación en el arranque o durante las averías en planta.

Calderas de lecho fluidizado. Las calderas de lecho fluidizado están siendo desarrolladas para sacar partido de los grandes depósitos de carbón que existen, así como para sobreponerse al problema de contaminación que puede existir al quemar carbón. Los méritos de usar la combustión en lecho fluidizado son los siguientes:

1. Pueden quemarse combustibles con alto contenido en azufre sin tener que echar mano del tratamiento de los gases de combustión. Esto se cumple al inyectar caliza en el lecho, la cual absorbe el dióxido de azufre.
2. Se obtienen mayores rendimientos de combustión.
3. Son posibles menores temperaturas de combustión, que minimizan la formación de óxidos de nitrógeno y de escorias en el hogar.
4. Los productos de desecho formados a menores temperaturas de lecho son más fáciles de manejar y llevar al vertedero.

Un lecho fluidizado consta de partículas granuladas flotando sobre una parrilla o criba no pasante (para el material) a través de la cual se insufla aire a velocidad suficiente para elevar y hacer flotar las partículas. Se forman burbujas (calderas de lecho fluido burbujeante) hasta el punto en que la masa actúa ahora como un líquido en ebullición. Véase la Figura 4.14 de la página siguiente. Las partículas que se mantienen en suspensión son generalmente de caliza. El carbón pulverizado se in-

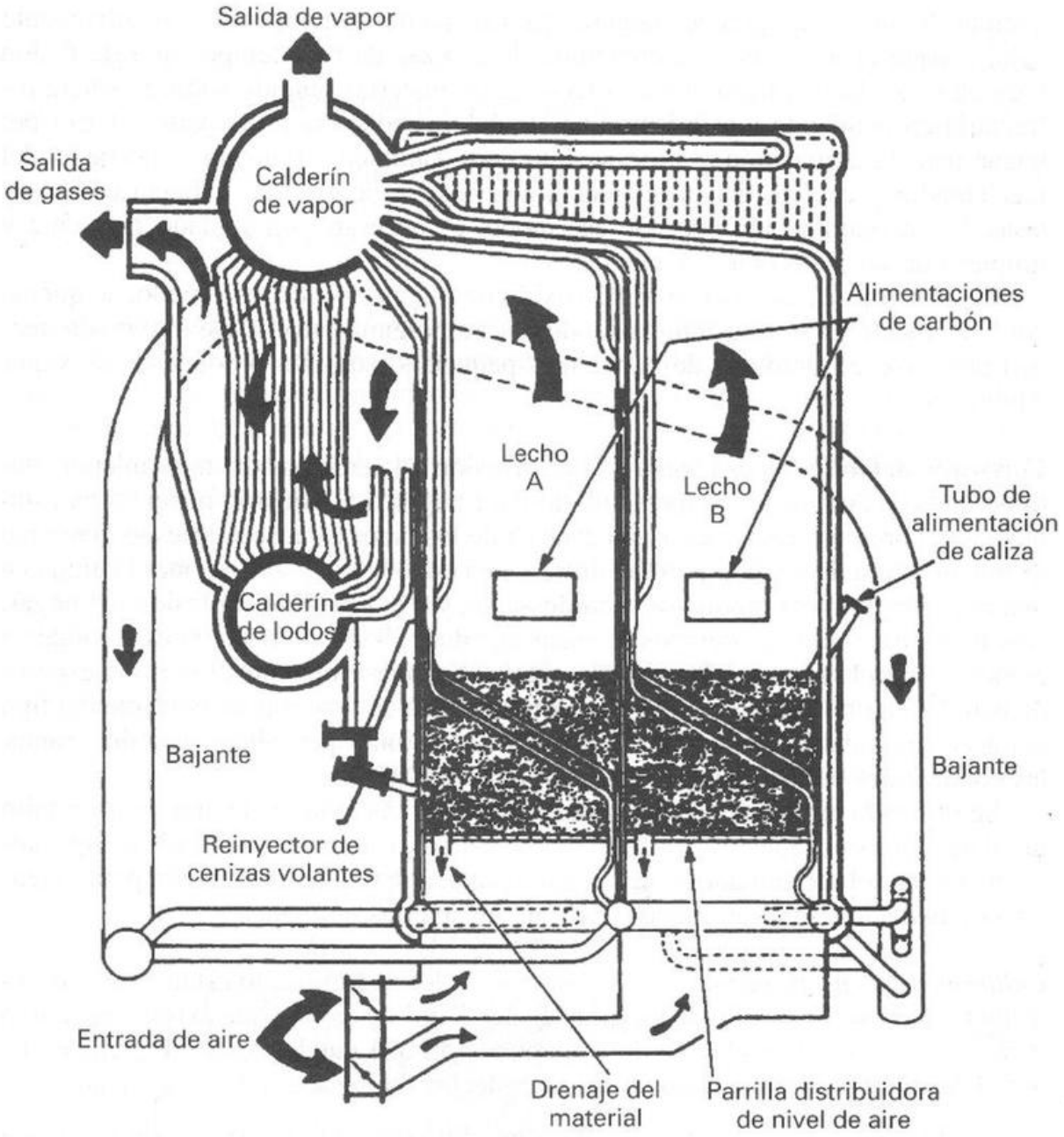


Figura 4.14. La caldera de lecho fluidizado atmosférico burbujeante de tipo tubos de agua genera 45.360 kg/hr de vapor a 43,15 bar. (*Cortesía de Foster Wheeler Corp.*)

yecta en la caliza y se quema. Para capturar el azufre del combustible, la temperatura del lecho se controla aproximadamente a 843 °C, a la que la captura óptima del sulfuro por la caliza ocurre formando sulfato cálcico. También se inyecta constantemente caliza en bruto en el lecho, mientras un sistema de drenaje por gravedad arrastra el material utilizado incluyendo partículas de ceniza del carbón. La baja temperatura de trabajo en el lecho fluido produce poca formación de óxidos de nitrógeno. Las partículas que son arrastradas por la corriente de gases de combustión pueden ser capturadas por precipitadores convencionales atmosféricos o por filtros de mangas.

Los *lechos atmosféricos* queman en el hogar a presión atmosférica. Éstos se clasifican además como sigue. Véase la Figura 4.15 de la página 158, que muestra los tres tipos.

1. *Lecho burbujeante:* Figura 4.15*a*. En este lecho, la profundidad durante la operación es aproximadamente de 1,20 a 1,50 metros y se reduce a 0,3 metros sin una elevada velocidad de aire.
2. *Lecho profundo:* Figura 4.15*b*. Trabaja de la misma manera que el lecho burbujeante, pero con mayores profundidades de combustible, arena y caliza.
3. *Lecho circulante fluidizado:* Figuras 4.15*c* y *d*. En esta configuración el lecho es más profundo que en las otras dos, con la fluidización extendiéndose desde la parte inferior del hogar o cámara de combustión hasta la parte superior del mismo. Las partículas de combustible que se están quemando y el material inerte son arrastrados desde la cámara de combustión al interior de un ciclón separador. Esto permite que los gases de combustión calientes y algunas partículas finas inertes pasen a la sección generador de vapor del conjunto de la caldera. El ciclón separador tiene pasos en la corriente que producen un efecto en espiral que separa determinados tamaños de partículas de la corriente de gases.

Nótese que el agua de alimentación se calienta en el intercambiador de calor exterior con generación de vapor que tiene lugar en la sección de convección de la caldera de lecho fluidizado.

La *combustión en lecho fluidizado presurizado* está siendo desarrollada en plantas de demostración; sin embargo, la investigación y desarrollo básicos han sido completados de modo que la utilización comercial de la misma está progresando. El sistema de lecho fluido presurizado trabaja a presiones por encima de los 10,5 bar y los gases calientes, después de una limpieza adecuada, se dirigen a un turbogenerador de gas, como se ve en la Figura 4.16 de la página 159. Los elementos fundamentales son una caldera, donde se produce y se recalienta el vapor para accionar un turbogenerador de vapor, y el turbogenerador de gas, que utiliza los gases de combustión en una disposición de ciclo combinado. La energía generada es de aproximadamente 50 por 100 por cada motor (motor primario). El combustor de cabecera, mostrado en la Figura 4.16, quema un gas de bajo poder calorífico proveniente de un hogar de pirólisis previo a la entrega de gas a la turbina de gas para aumentar la temperatura de gases hasta cerca de 1.370 °C. La tecnología de lecho fluido presurizado bajo desarrollo en proyectos de demostración tiene sus últimos objetivos en quemar el carbón limpia y eficazmente y usar los gases limpios para dar energía a una turbina de gas en una disposición de ciclo combinado. Se espera que esto aumente el rendimiento térmico de las plantas de combustión de carbón.

La *estanqueidad de las paredes tubulares* es un objetivo que preocupa a las calderas de lecho fluidificado por varios motivos, incluyendo la erosión de las cenizas volantes en el economizador, secciones de convección y superficies calefactoras de las paredes de los tubos de agua. Las altas velocidades de los gases y el flujo de gases con partículas abrasivas se citan entre los motivos. El control de la erosión sobre los tubos se practica hoy por medio de proyectores de capas de metal con aleaciones resistentes al desgaste. La soldadura con electrodos de revestimento también se ha utilizado.

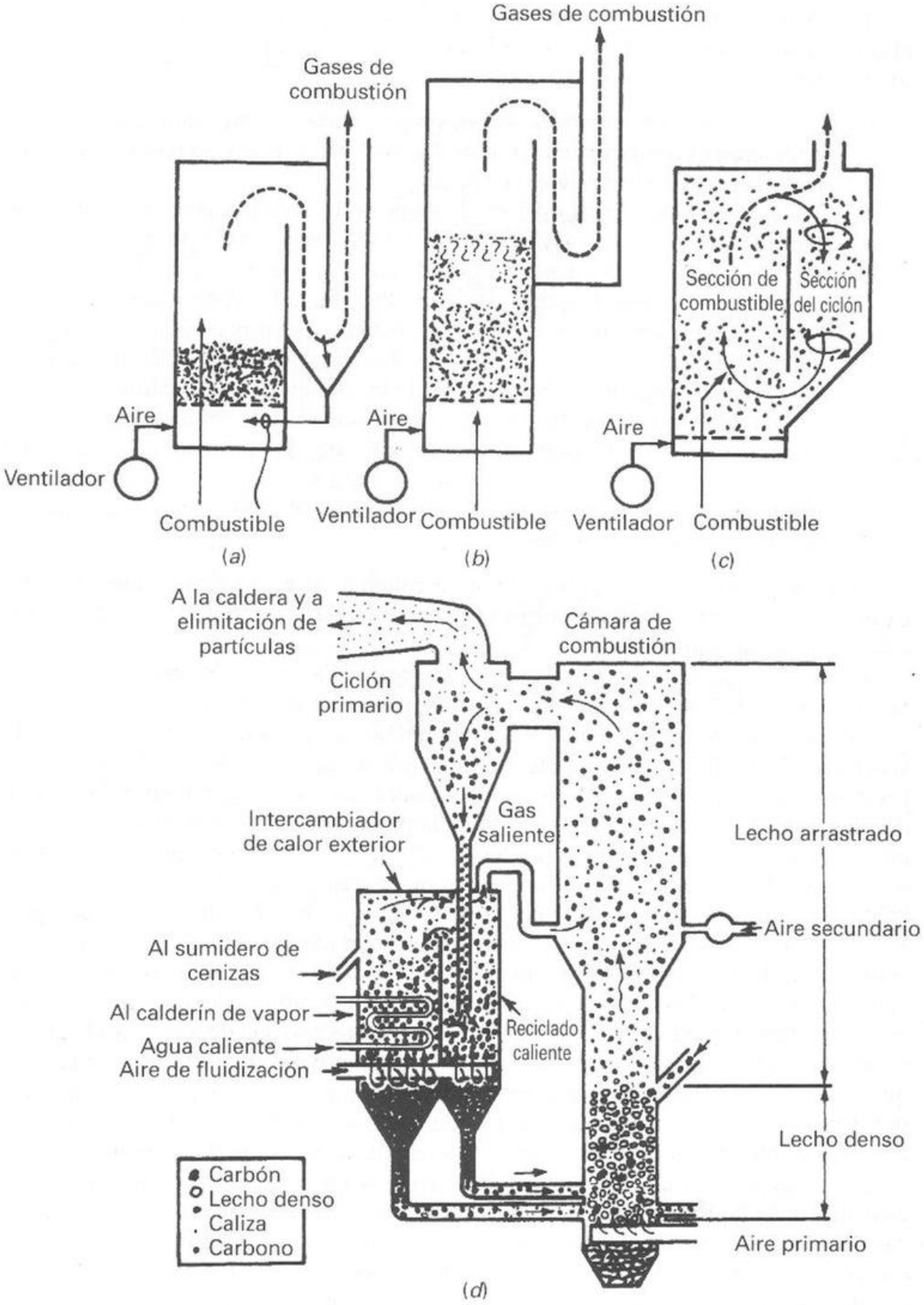


Figura 4.15. Tipos de lechos atmosféricos fluidizados. (*a*) Lecho burbujeante. (*b*) Lecho profundo. (*c*) Lecho circulante. (*d*) Un ciclón separa las partículas en el lecho circulante.

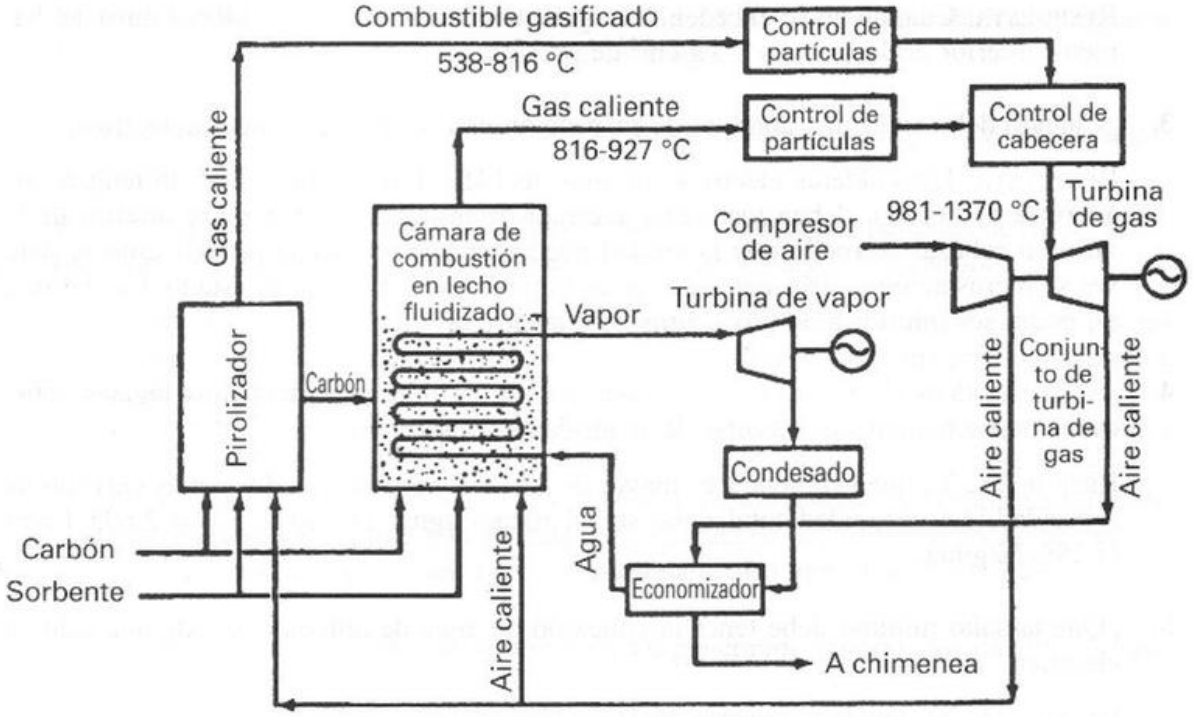


Figura 4.16. Caldera de lecho fluidizado-presurizado con cámara de combustión en cabeza en una disposición de planta en ciclo combinado.

Problemas de desgaste de tubos. Las calderas de aplicaciones especiales plantean problemas de desgaste y rotura de muchos de sus componentes; sin embargo, continuamente se desarrollan nuevos materiales como tubos de materiales resistentes a la erosión, para reducir el desgaste y la erosión anormales. Los metales que se están usando hoy en día para resistir la erosión y corrosión varían según las aplicaciones:

1. Para tubos metalizados por proyección, se usa el aluminuro de níquel y el titanuro de níquel, aplicadas por compañías especializadas.
2. Para revestimento por plasma se emplean las aleaciones de níquel-titanio y de cromo-níquel.
3. Para endurecimiento superficial, las aleaciones que contienen alrededor del 18 por 100 de cromo son las más usadas hoy en día.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

1. ¿Cuál es el espesor mínimo de chapa permitido para las virolas o cabezales sometidos a presión en una caldera eléctrica?

RESPUESTA: La chapa debe ser al menos de 3/16″ (4,7625 mm) de espesor por las normas de la Sección I (código ASME).

2. ¿Cuándo no se requiere tratamiento térmico posterior a la soldadura y radiografía en una junta soldada de una caldera eléctrica?

RESPUESTA: Cuando no se exceden las siguientes limitaciones: 16″ (406,4 mm) de diámetro interior de la virola y 7 kg/cm^2 de presión.

3. ¿Cuándo debe tener una abertura de inspección practicable una caldera eléctrica?

RESPUESTA: Las calderas eléctricas de más de 141,6 l de volumen que no tengan una abertura de hombre deben tener una abertura de inspección en la parte inferior de la virola o cabezal de modo que la unidad pueda ser inspeccionada periódicamente para ver su incrustación u otros depósitos y ser limpiada de acuerdo a su estado. La abertura no podrá ser inferior a 3″ (76,2 mm) de diámetro de tubo.

4. ¿Si una caldera eléctrica tiene una potencia de 750 kW, qué requisitos legales sobre capacidad y número de válvulas de seguridad debe cumplir?

RESPUESTA: Ya que la potencia es mayor de 500 kW se requieren dos o más válvulas de seguridad. La capacidad total debe ser al menos igual a: 750 × 3,5 = 2.625 Lb/hr (1.190,7 kg/hr).

5. ¿Qué tamaño mínimo debe tener la conexión de agua de alimentación de una caldera eléctrica?

RESPUESTA: No puede ser menor de 1/2″ (12,7 mm).

6. ¿Qué tipo de caldera eléctrica no necesita sistema de corte por bajo nivel de agua?

RESPUESTA: Las calderas del tipo de electrodo no requieren corte por nivel bajo, porque el agua de la caldera cierra el circuito eléctrico de electrodo a electrodo. El nivel bajo de agua interrumpe el consumo eléctrico, sirviendo así al mismo propósito que el corte por nivel bajo.

7. ¿Cuándo se necesitan dos niveles de vidrio en las calderas eléctricas?

RESPUESTA: Ningún tipo de caldera de electrodo funcionando a presiones de más de 28 kg/cm^2 requiere dos niveles de agua de vidrio.

8. ¿Cuántas válvulas de purga se necesitan en una caldera eléctrica trabajando a más de 1,05 kg/cm^2 y con un contenido de agua de 95 galones (360 l)?

RESPUESTA: El Código requiere sólo una válvula de purga si el contenido de agua no excede de 100 gal (378,5 l).

9. ¿Cuál es la capacidad mínima de una válvula de seguridad determinada para una caldera de agua de alta temperatura?

RESPUESTA: Utilice la capacidad máxima de diseño en BTU/hora del combustible utilizado y divida ésta por 1.000 para obtener libras por hora de capacidad de descarga.

10. ¿Qué es un generador vaporizador de fluido?

RESPUESTA: Es un recipiente cerrado en el que un medio transmisor de calor distinto del agua es vaporizado a presión por aplicación de calor con el medio térmico de transferencia utilizado exteriormente al recipiente cerrado.

11. ¿Tienen las compañías de seguros contra incendios y las regulaciones legales locales requerimientos sobre calentadores de fase líquida o de fase vapor?

RESPUESTA: Sí, a causa del distinto riesgo de incendio que puede existir con algunos fluidos orgánicos incluyendo los aceites minerales.

12. ¿Pueden instalarse discos de ruptura entre un vaporizador orgánico y la válvula de seguridad requerida?

RESPUESTA: El Código permite esta disposición para minimizar pérdidas de fluido orgánico, pero deben añadirse ciertos requerimientos del Código. Por ejemplo:

1. El disco de ruptura debe tener un tarado de presión y temperatura de ruptura que no excedan la presión permisible del vaporizador y debe estar a una presión inferior a la de tarado de la válvula de seguridad.
2. Debe haber suficiente volumen después de la ruptura del disco para que la apertura de la válvula de seguridad no se vea afectada si la rotura del disco funciona.
3. Debe haber un manómetro, grifo de prueba o venteo abierto en el espacio existente entre el disco de ruptura y la entrada de la válvula de seguridad de modo que pueda determinarse la ruptura del disco de estanqueidad o una fuga, si existiese.

13. ¿Qué tipo de nivel de vidrio se requiere en un generador-vaporizador de fluido orgánico?

RESPUESTA: Debe ser del tipo de nivel de vidrio plano con estructura resistente de acero forjado. Los grifos de nivel no pueden utilizarse para evitar goteo o despilfarro de drenaje del fluido orgánico.

14. ¿Puede una válvula de seguridad tener una palanca manual instalada para protección de sobre presión en un vaporizador de fluido orgánico?

RESPUESTA: No se permite ninguna palanca para evitar descargas accidentales de fluido orgánico. La válvula de seguridad debería accionarse por lo menos una vez por año y probada fuera de la unidad para comprobar su ajuste y capacidad de descarga. La descarga de una válvula de seguridad instalada debería ir dirigida a un condensador o, como mínimo, a un punto seguro exterior al edificio.

15. ¿A que presión debe diseñarse un vaporizador?

RESPUESTA: Al menos 40 psi (2,8 kg/cm^2) por encima de la presión de trabajo a la cual va a ser utilizado con el mismo factor de seguridad aplicado a este diseño por las regulaciones del Código.

16. ¿Qué dos requisitos regulan la selección de válvulas de seguridad para generadores de fase vapor y fase líquido orgánico?

RESPUESTA: El ajuste de presión no puede ser mayor que la presión máxima permisible de la unidad, y la capacidad debe ser por lo menos igual a la máxima producción (BTU/hr o kcal/hr) del generador.

17. ¿Qué tipo de válvulas debería utilizarse para aplicaciones HTHW?

RESPUESTA: Los asientos de válvula, agujas de cierre y cuerpos deberían estar hechos sólo de acero fundido, forjado o aleaciones de acero. Los asientos de válvula deberían ser de acero inoxidable al cromo-níquel para evitar la erosión y corrosión por el flujo de agua. Los tarados de presión deberían seguir el Código de calderas sobre válvulas de

corte, de alimentación y de purga, cuya norma es del 125 por 100 de la presión de trabajo permisible de la caldera.

18. ¿Necesitan nivel de agua de vidrio los generadores HTHW?

RESPUESTA: Sólo si la caldera de circulación natural tiene calderín que se utilice como vaso de expansión. Si la caldera está totalmente llena de agua a presión y tiene vaso de expansión exterior, el Código de calderas no requiere nivel de vidrio ni grifos de prueba.

19. En calderas de circulación forzada para sistemas HTHW, ¿qué provisión debería hacerse para evitar puntos calientes o falta de circulación en caso de fallo o rotura de bomba?

RESPUESTA: Debería instalase un dispositivo de flujo o de presión diferencial para cortar el equipo de combustión en caso de que no fluya o circule agua.

20. ¿Debería utilizarse un corte de combustible por bajo nivel de agua en un generador HTHW del tipo de hogar suspendido?

RESPUESTA: Algunos estados (de EE. UU.) ahora requieren un corte por bajo nivel de agua o presión baja en los sistemas de calefacción de agua caliente. Por ello, este dispositivo de seguridad es incluso más necesario en una caldera de agua de alta temperatura. Debería instalarse sobre la caldera para cortar el combustible en caso de que el nivel caiga por debajo de un nivel peligroso.

21. Cite tres métodos de presurización en un sistema HTHW.

RESPUESTA: Tres métodos son:

1. Colchón de vapor.
2. Presurización por gas como el uso de nitrógeno como gas colchón inerte.
3. Presurización mecánica que hace uso de vaso de expansión y bomba.

22. Cuando se aplica un tratamiento químico a una caldera eléctrica de electrodo para minimizar la formación de revestimiento o capas de sales y otras consideraciones similares del agua, ¿qué otro factor debe considerarse en el tratamiento?

RESPUESTA: El efecto del tratamiento sobre la conductividad del agua. Si la conductividad se vuelve demasiado elevada (baja resistencia al flujo eléctrico), puede ocurrir un cortocircuito que puede dañar al electrodo y al aislamiento. Si la conductividad es demasiado baja (elevada resistencia al flujo de corriente), la unidad puede no ser capaz de alcanzar su producción.

23. Cite algunas ventajas típicas de quemar combustibles residuales en un generador de vapor.

RESPUESTA: Las ventajas para una planta que tiene un combustible residual como subproducto de un proceso de fabricación son:

1. Tener un medio barato y económico disponible para producir vapor en comparación con las calderas de combustible fósil que requieren la compra del combustible.
2. Disponer de un combustible que no está afectado por cortes de suministro de los combustibles líquidos y gaseosos.
3. El subproducto puede disponerse para el generador de vapor; de modo que los reglamentos de vertido de residuos poder ser obviados cuando el residuo tiene que verterse en el campo o en un medio similar que puede afectar al medioambiente.

24. Cite tres requisitos de combustión para el combustible de residuos de madera en un generador de vapor.

RESPUESTA: En la combustión de residuos de madera el tipo de equipo de combustión a utilizar y factores similares a cumplir son los siguientes:

1. Evaporación de la humedad de la madera.
2. Destilación y combustión de los componentes volátiles del residuo.
3. Combustión de la materia carbonosa remanente en la madera.

25. ¿Cuál es la regulación del Código para establecer la presión permisible sobre un tubo bimetálico como los que se utilizan en calderas de combustible residual?

RESPUESTA: Por Código, sólo el interior o núcleo del espesor y diámetro del tubo se utilizan al calcular la presión admisible en tubos bimetálicos. El recubrimiento o revestimiento de acero inoxidable se considera como material resistente al desgaste, así como no contribuyente a la resistencia del tubo para soportar la presión.

26. En una planta de ciclo combinado, ¿cuál es la capacidad de la válvula de seguridad requerida, determinada por la caldera de recuperación de gases que utiliza poscombustión (combustión suplementaria)?

RESPUESTA: El fabricante de la caldera está requerido legalmente a calcular y estampar la capacidad máxima en kg/hr de la combinación de generación de vapor por calores perdidos más el añadido por la poscombustión o combustión suplementaria. La capacidad de la válvula de seguridad de presión debe ser igual, al menos, a aquella capacidad. Esto se aplica a las diferentes presiones en una caldera de calores perdidos de varias presiones.

27. ¿Qué es la cogeneración?

RESPUESTA: Cogeneración es una generación simultánea o producción coincidente de electricidad y calor para satisfacer las necesidades térmicas de vapor de un complejo de fabricación. Normalmente el vapor de alta presión se produce in situ con generadores de vapor. Este vapor de alta presión se pasa a través de un turbogenerador para obtener energía eléctrica y vapor de proceso, por extracción del vapor de la turbina a la presión necesaria por el proceso. Pueden usarse varias presiones de extracción. El balance de calor conjunto para una planta de cogeneración puede ser atractivo en comparación con comprar solamente energía eléctrica y generar vapor para el proceso por separado.

28. Cite tres razones por las cuales las calderas de recuperación de calores perdidos son normalmente del tipo de tubos de agua.

RESPUESTA: Las calderas de tubos de agua están favorecidas por las siguientes razones:

1. Son posibles grandes caudales másicos de calores perdidos.
2. Las partículas sólidas atrapadas son recuperables más fácilmente en tolvas y equipo similar.
3. Es posible una mejor disposición de los tubos para evitar problemas de erosión y depósito de escorias.

29. Cite tres posibles focos de explosión del hogar en una caldera de recuperación del tipo de licor negro.

RESPUESTA:

1. Reacción entre el agua y las materias fundidas o bien fallo (rotura) de un tubo y/o una simple fuente de agua que entre en el hogar.
2. Reacción entre el licor negro diluido o de baja concentración que se derrama sobre el hogar y, a causa de su elevado contenido de agua con la materia fundida del hogar.
3. Ignición convencional de combustible inquemado proveniente de los quemadores auxiliares que usan gas o gas-oil (fuel-oil) como combustibles, con la ignición iniciando una explosión en el lado hogar cuando el combustible acumulado se inflama.

30. Cite los tres tipos de combustión atmosférica en lecho fluidizado.

RESPUESTA: Lecho burbujeante, lecho profundo y lecho circulante.

31. ¿Cuál es la principal causa de corrosión en el lado hogar de las calderas de recuperación de licor negro?

RESPUESTA: La corrosión por sulfuración, causada por el azufre contenido en los gases de combustión bajo condiciones reductoras parece ser la causa principal de desgaste en el lado metálico de los tubos, aunque el mecanismo de corrosión no está totalmente desvelado. Es, pues, esencial establecer un programa de comprobación del espesor de los tubos del hogar o de otros tubos expuestos al lecho fluidizado de materias en el hogar para evitar cualquier corrosión a través de los tubos por rociado de agua en el lecho con materiales fusibles, y así producir una violenta reacción de materias fundidas-agua, tipo explosión en la caldera de recuperación.

32. ¿Cuál es la diferencia principal entre el lecho circulante y el lecho burbujeante en la combustión en lecho fluidizado?

RESPUESTA: En la combustión de lecho fluidizado circulante, hay velocidades de aire más elevadas a través de la zona de combustión, comparado con el lecho atmosférico burbujeante. Esta velocidad del aire aumentada impulsa pequeñas partículas de combustible, caliza y cenizas hacia la parte superior del hogar. Esto aumenta la capacidad térmica de las partículas circulantes y gases calientes, lo que produce una temperatura más uniforme en el hogar. El mayor tiempo de combustión y de captación de azufre en el hogar comparado con un diseño de lecho fluido no circulante da como resultado:

1. Mayor eficiencia de combustión.
2. Reducida formación de CO y NO_x.
3. Mejor utilización de la caliza para la recolección de SO_2. También un ciclón mecánico en una combustión de lecho fluido circulante quemando después de la sección de hogar ayuda a eliminar las partículas arrastradas en los gases de combustión, ayudando a su vez a convertir cualquier partícula inquemada de combustible en energía calorífica.

Capítulo 5

GENERADORES DE VAPOR DE PLANTAS NUCLEARES

La generación de energía eléctrica mediante energía nuclear es una técnica que difiere considerablemente de las plantas que queman combustibles fósiles y requiere tipos especiales de operadores, así como equipos de inspección y mantenimiento. Los sistemas de energía nuclear dependen de la fisión controlada de combustible nuclear como fuente de calor en vez de una caldera que quema combustible fósil. Sin embargo, ambas usan un medio para suministrar calor, y este medio transfiere el calor bien directamente a un reactor de agua en ebullición o indirectamente a un reactor de agua presurizada, para hacer vapor que es después utilizado por un turbogenerador de vapor.

El proceso de fisión implica separación atómica, y éste es el término de energía atómica comúnmente usado al describir el proceso de generación de energía nuclear.

ESTRUCTURA ATÓMICA Y ENERGÍA ATÓMICA

Una breve revisión de la fuente de energía atómica y los riesgos especiales implicados al generar energía se ofrece como material introductorio para un mayor estudio de textos avanzados en este tema.

Una revisión de la estructura del átomo revelará que el núcleo está formado por protones y neutrones definidos como sigue:

Un *protón* es una *partícula de materia cargada positivamente.* Hay normalmente en el núcleo un protón por cada partícula cargada negativamente o electrón que gira alrededor del núcleo. El protón cargado positivamente atrae al electrón cargado negativamente girando alrededor del núcleo, y esto evita que el electrón salga despedido por la fuerza centrífuga, justamente lo mismo que la Tierra mantiene su órbita alrededor del Sol por fuerzas gravitatorias.

Un *neutrón* es materia sin carga eléctrica del núcleo y pesa aproximadamente lo mismo que un protón. Hay una fuerza de sujeción fuerte que mantiene unidos a protones y neutrones. El número de neutrones no es fijo, sino que varía con los átomos, aunque éste no afecta al número atómico. Los neutrones no afectan a las

propiedades químicas de los elementos, como sí lo hacen los protones y electrones. Como los neutrones no tienen carga, son muy útiles en las aplicaciones de bombardeo nuclear. Se desplazan en línea recta hasta que entran en contacto con otra materia. Esto los hace muy útiles para separar el núcleo de un átomo.

Los *electrones* son partículas cargadas negativamente un poco más ligeras que los protones. De hecho pesan cerca de 1/1.800 del peso de un protón. Los electrones están dispuestos en anillos alrededor del núcleo, con un número definido de electrones por anillo. Esto es, el primer anillo aloja dos electrones, el segundo, ocho, el tercero, dieciocho, hasta alcanzar un máximo de 32. El número total de electrones en un átomo es igual al número de protones en el núcleo, que es también el número atómico del átomo. El uranio tiene el número atómico más elevado con 92 y, por tanto, también tiene el mayor número de electrones rodeando al núcleo.

El material que es capaz de capturar neutrones y además romper un átomo en dos o más partículas se llama material fisionable. El uranio 235, uranio 233 y plutonio 239 son materiales fisionables. Cuando un átomo se rompe por un neutrón que se desplaza a gran velocidad de forma que dos o más fragmentos se separan del átomo, esto se llama fisión.

Durante la fisión, se desprenden de dos a tres neutrones del átomo roto. Una reacción en cadena es el resultado de lo siguiente: si uno de estos neutrones libres es capturado por otro átomo y produce la fisión de ese átomo y después a su vez se produce otro neutrón libre para entablar una reacción en cadena de fisión. La relación del número de neutrones que causa fisión, al número de neutrones inicialmente producido se llama *efecto multiplicativo* (multiplicación de efectivos).

La ley fundamental de la física en la cual se basa una reacción nuclear es la ley de Einstein, que interrelaciona la masa con la energía: la energía es igual a la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz ($E = mv^2$). Uno debe darse cuenta, sin embargo, que el término velocidad es la de la luz. Se ha establecido, por ejemplo, que una libra (450 g) de uranio 235, cuando choca con un (proyectil) neutrón, explotará para formar átomos más ligeros y neutrones separados. Algo de esa masa, cerca de 1/1.000 de libra (0,454 g) se pierde en forma de energía que es equivalente a cerca de 11,4 millones de kWh de energía. Muchos otros principios de física nuclear están implicados en una reacción nuclear, pero están más allá del alcance de este libro.

El método actual de generación de energía nuclear es por fisión o separación del núcleo de ciertos átomos pesados al bombardearlos con neutrones. Golpeando el núcleo del isótopo 235 del uranio, estos neutrones se separan del átomo para formar nuevos elementos, tales como el kriptón y bario, desprendiendo energía en forma de calor y liberando neutrones adicionales del núcleo que pueden bombardear otro núcleo para mantener la reacción (en cadena) funcionando. Otro átomos que fisionan son el uranio 235, torio, plutonio y uranio 238.

La Figura 5.1 es un esquema del ciclo indirecto, donde el refrigerante del reactor transfiere calor a un líquido separado que trabaja en un generador de vapor. Éste es un sistema de reactor de agua presurizada (PWR). En un ciclo directo, el refrigerante calentado es vapor de agua y éste se utiliza como medio de trabajo en un turbogenerador de vapor.

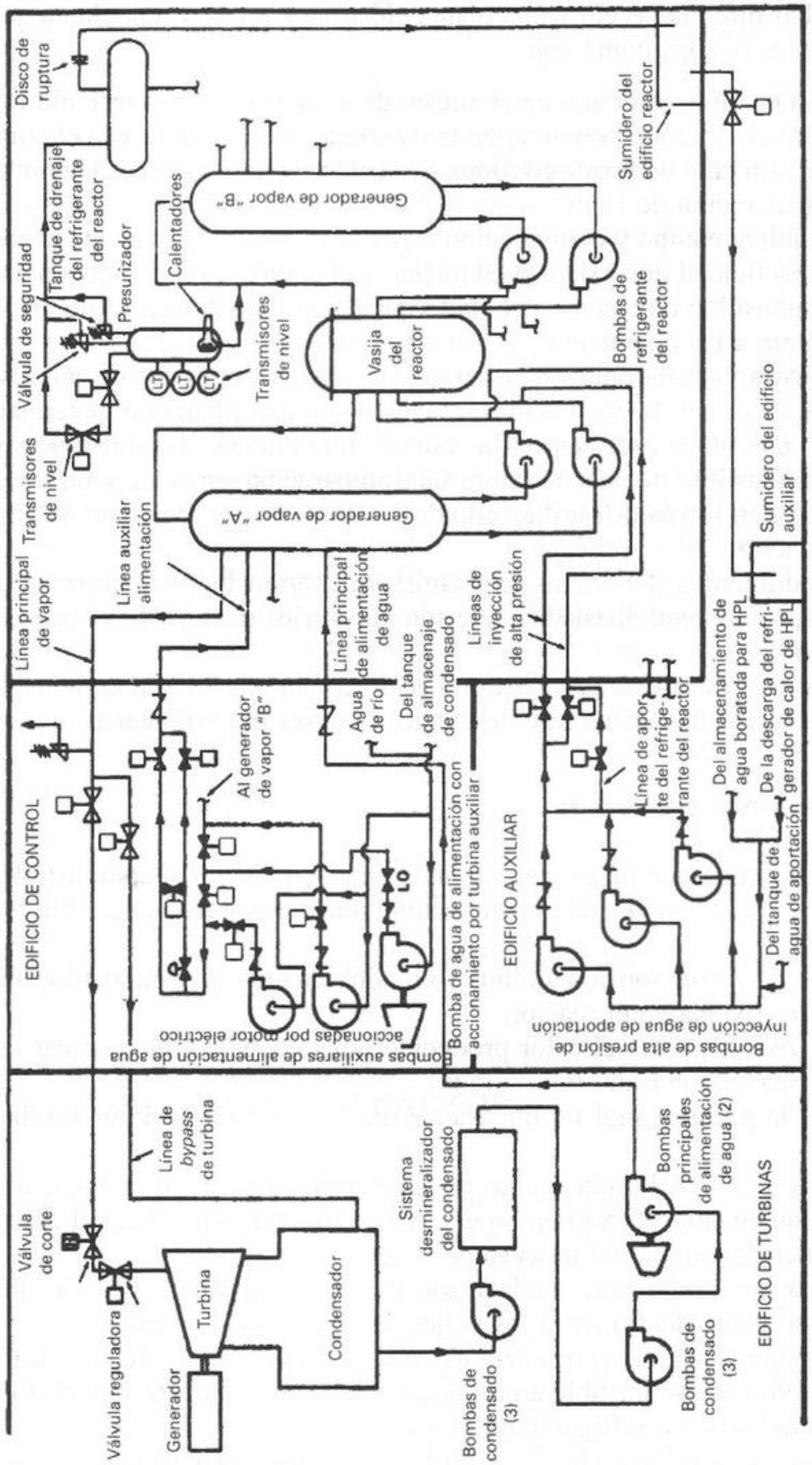


Figura 5.1. Esquema de una planta nuclear de generadores de vapor indirecto usando agua presurizada como refrigerante y dos cambiadores de calor como generadores de vapor. (*Fuente*: Registro Federal.)

Hay muchas diferencias entre una planta eléctrica nuclear y una planta que quema combustibles fósiles, como son:

1. El combustible insertado en el núcleo de un reactor permanece allí un largo período comparado con una planta de combustible fósil donde el combustible se alimenta de forma continua a la caldera para mantener la combustión o la generación de calor.
2. Se requiere equipo y manutención especial en una planta nuclear a causa de la radiactividad que existe en el núcleo y el equipo que está en contacto con el combustible o reacción del núcleo. Esto afecta a la técnica de inspección así como a las operaciones y mantenimiento.
3. Para evitar la diseminación de la radiactividad, se requieren diseños especiales de la vasija de contención del reactor en una planta de generación nuclear, que no se precisan en las plantas que queman combustibles fósiles.
4. El combustible nuclear requiere una preparación especial y un procesado especial en forma de varillas cilíndricas antes de ser insertado en el núcleo del reactor.
5. Procedimientos elaborados de seguridad en forma de instrumentos y controles especialmente diseñados, que son necesarios para evitar el riesgo de radiación.
6. Como no hay aire de combustión necesario para quemar al combustible, ya que éste es nuclear, no hay descargas de gases por chimeneas.

Algunos términos nucleares

Éstos se presentan ya que no existen en las plantas que queman combustible fósil.

Crítico es el punto en el cual el combustible nuclear puede mantener la reacción en cadena.

Productos de fisión son los átomos formados cuando el combustible nuclear, como el uranio, fisiona en el reactor.

Calor de decadencia es el calor producido por el combustible nuclear después que el reactor ha sido cerrado (clausurado).

Núcleo es la parte central de un reactor nuclear que contiene el conjunto del combustible.

Las barras de control están hechas de un material especial que puede absorber neutrones y que cuando se insertan en el combustible nuclear cortan el reactor nuclear al producir la parada del proceso de fisión.

Las barras de combustible nuclear son de forma cilíndrica y de un material especial que contiene dentro de él los pellets de combustible nuclear.

La cubierta en las plantas nucleares de combustible uranio es de una aleación de circonio que rodea al combustible uranio y que actúa como barrera ante el combustible y el agua del sistema refrigerante del reactor.

Máxima dosis permisible (MPD) es el límite legal de exposición a la radiación al que una persona puede someterse en una central nuclear según lo establece la NRC (National Regulatory Commission). Para el público, en general, el límite es 500 milirems por año. Para trabajadores de plantas nucleares es de 5.000 milirems por año.

Milirem es la unidad utilizada para la medida de dosis de radiación y se define como la milésima parte del rem, donde rem o equivalente hombre roentgen es una medida de radiación que indica el impacto potencial sobre las células humanas.

Nuclear Regulatory Commission (Comisión Reguladora Nuclear) es una agencia del gobierno federal de EE. UU. que establece la normativa de seguridad y supervisa las inspecciones de plantas nucleares de generación, a causa del riesgo interestatal inherente de que pueda ocurrir un accidente nuclear.

Sistema de eliminación del calor residual es una serie de bombas y cambiadores de calor que eliminan el calor del reactor después de que el proceso de fisión ha parado y el reactor nuclear ha sido cerrado.

Sistema de refrigeración de emergencia del núcleo es un sistema de retroalimentación del agua refrigerante diseñado para enfriar el reactor en caso de fallos del sistema primario de refrigeración.

Refrigerante primario es el agua que transfiere el calor de la reacción nuclear bien al vapor, como en un reactor de agua en ebullición, o a un bucle de refrigerante secundario con cambiador de calor para hacer vapor, como en un reactor de agua presurizada.

Dosímetro es un instrumento usado por el personal para medir la cantidad de radiación recibida en un tiempo determinado.

Radiactividad es la capacidad de algunos elementos para dar espontáneamente energía en forma de ondas o partículas cargadas. La radiación puede ser de rayos alfa, beta o gamma.

Radiación alfa (α) es el tipo menos penetrante y puede ser detenida por una hoja de papel.

Radiación beta (β) es emitida por el núcleo de un átomo durante la fisión, pero su penetración puede ser detenida por un cartón de cierto espesor.

Radiación gamma (γ) es emitida también desde el núcleo, tiene capacidad de penetración profunda y sólo puede ser detenida por un escudo protector pesado como plomo u hormigón.

Radiación de fondo es la radiactividad que tiene lugar de forma natural para la zona particular considerada.

TIPOS DE SISTEMAS DE REACTOR

Las vasijas del reactor se usan para alojar los elementos de combustible en una planta nuclear donde tiene lugar la reacción en cadena de la fisión nuclear. Los elementos más comunes a la mayoría de tipos de reactor son vasijas o recipientes del reactor, elementos de combustible, refrigeradores, moderadores y varillas de control de reacción. Véase la Figura 5.2 de la página siguiente.

Los reactores se clasifican generalmente según el tipo de refrigerante utilizado para extraer el calor de la reacción de fisión nuclear. Los más comunes son el reactor de agua presurizada, el reactor de agua en ebullición, el reactor de agua pesada, el reactor refrigerado por gas y el reactor refrigerado por un metal (sodio).

La Figura 5.3.*a* de la página 171 muestra un esquema de reactor de agua en ebullición (BWR), donde el agua calentada por la reacción nuclear del reactor se evapora en la misma vasija a presión y después se dirige al turbogenerador de vapor.

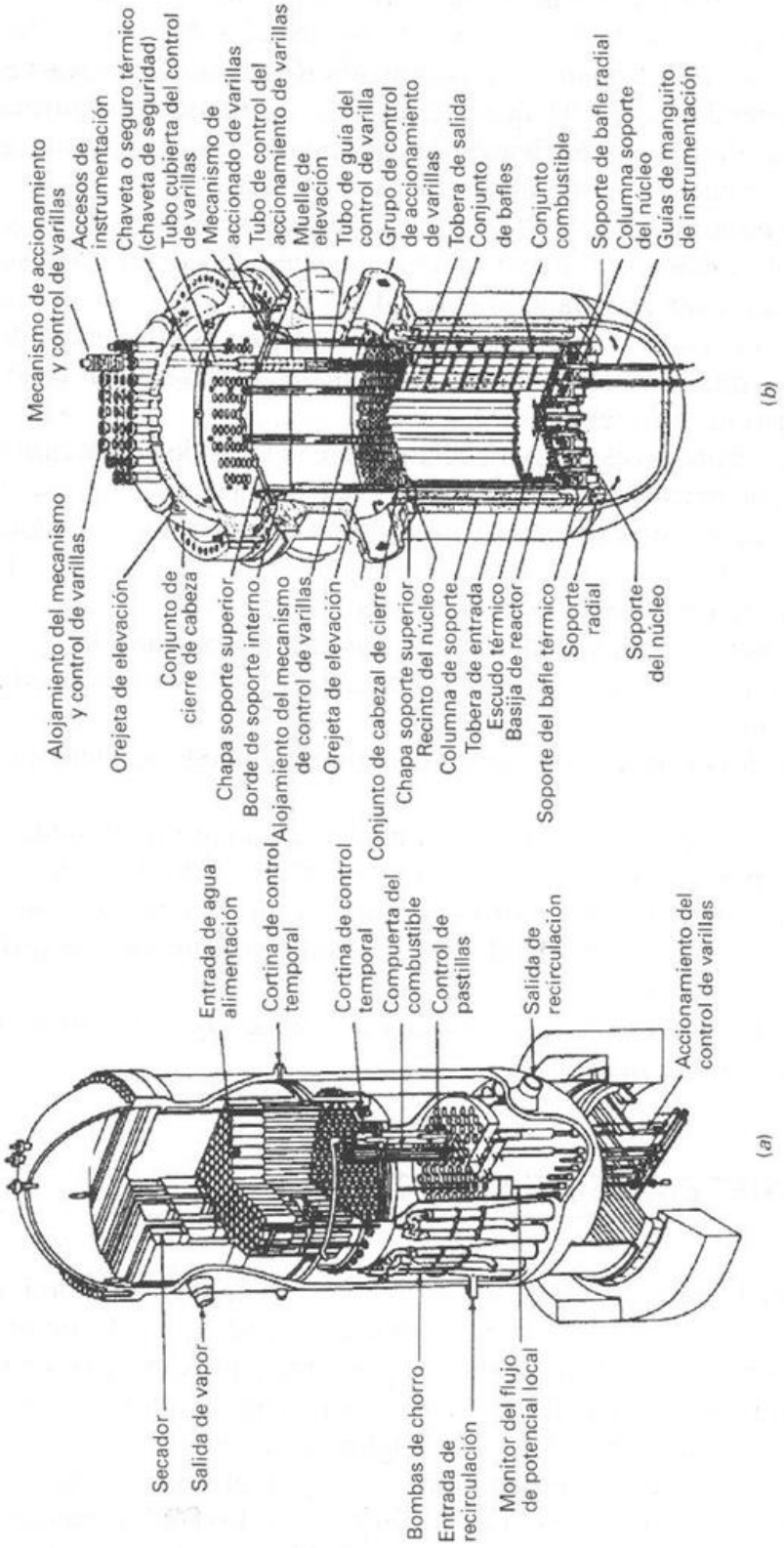


Figura 5.2. Partes internas de los reactores. (*a*) Del tipo de agua en ebullición (BMR). (*b*) Del tipo de agua presurizada (PWR).

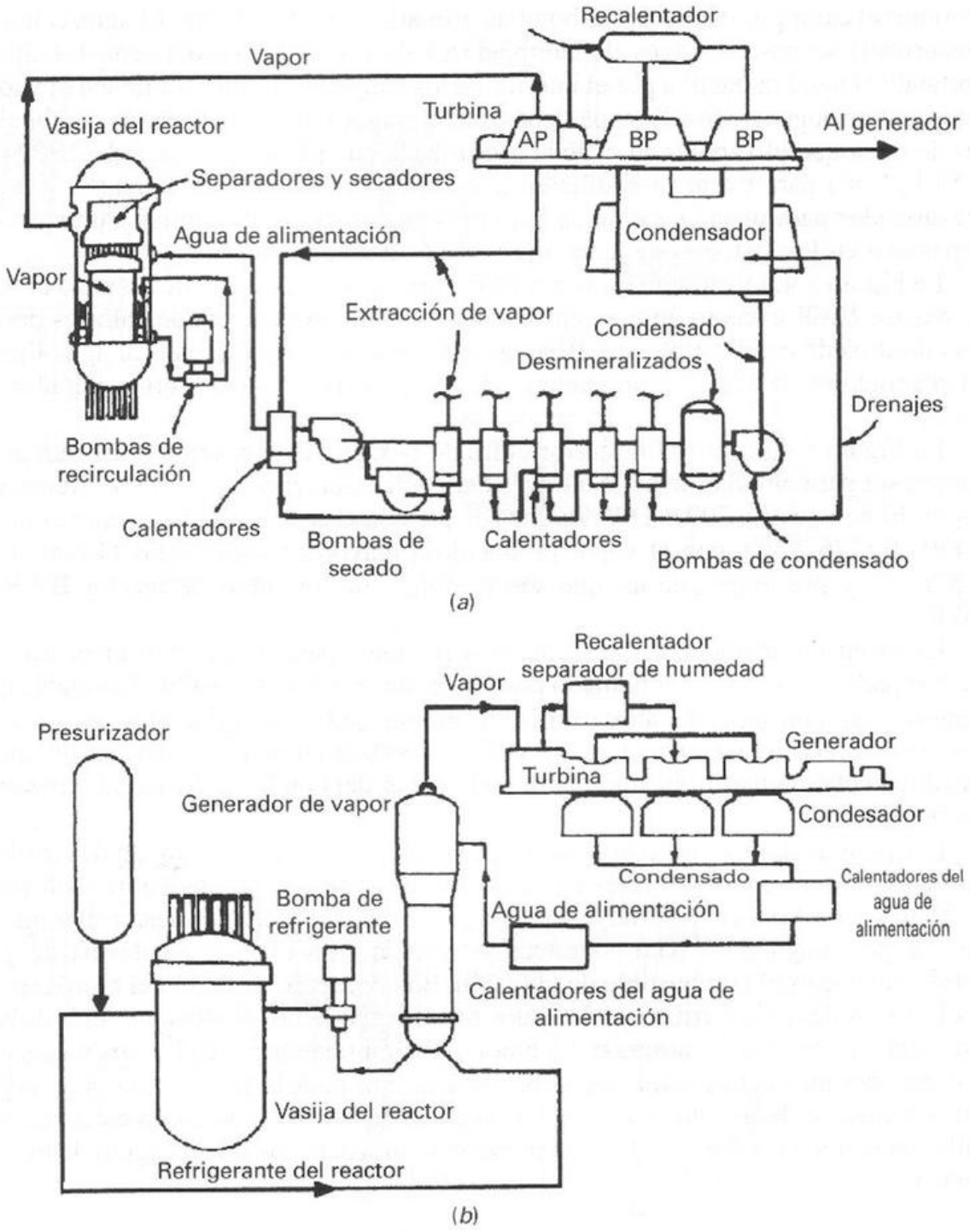


Figura 5.3. Dos sistemas de reactor nuclear comúnmente usados para generador de electricidad. (*a*) Reactor de agua en ebullición (BWR). (*b*) Reactor de agua presurizada (PWR).

El vapor se condensa, pasa a través de los calentadores de agua de alimentación y retorna al reactor por medio de la bomba de alimentación.

La Figura 5.3.*b* ilustra un esquema del reactor de agua presurizada (PWR). El refrigerante es agua a alta presión que se bombea a través del núcleo del reactor para

eliminar el calor por medio de las bombas primarias de refrigerante. El agua caliente presurizada se pasa a través de cambiadores de calor agua-vapor, con los tubos portando el agua radiactiva por el interior de los cambiadores que contienen el vapor que va al turbogenerador. El agua debe estar a mayor temperatura en los cambiadores de calor que el vapor, con el agua presurizada en el reactor a cerca de 2.200 psi (154 kg/cm^2) para evitar la ebullición a las altas velocidades del agua. Se usa un presurizador para mantener el agua bajo presión constante; es similar a un vaso de expansión en los sistemas de agua a presión y alta temperatura.

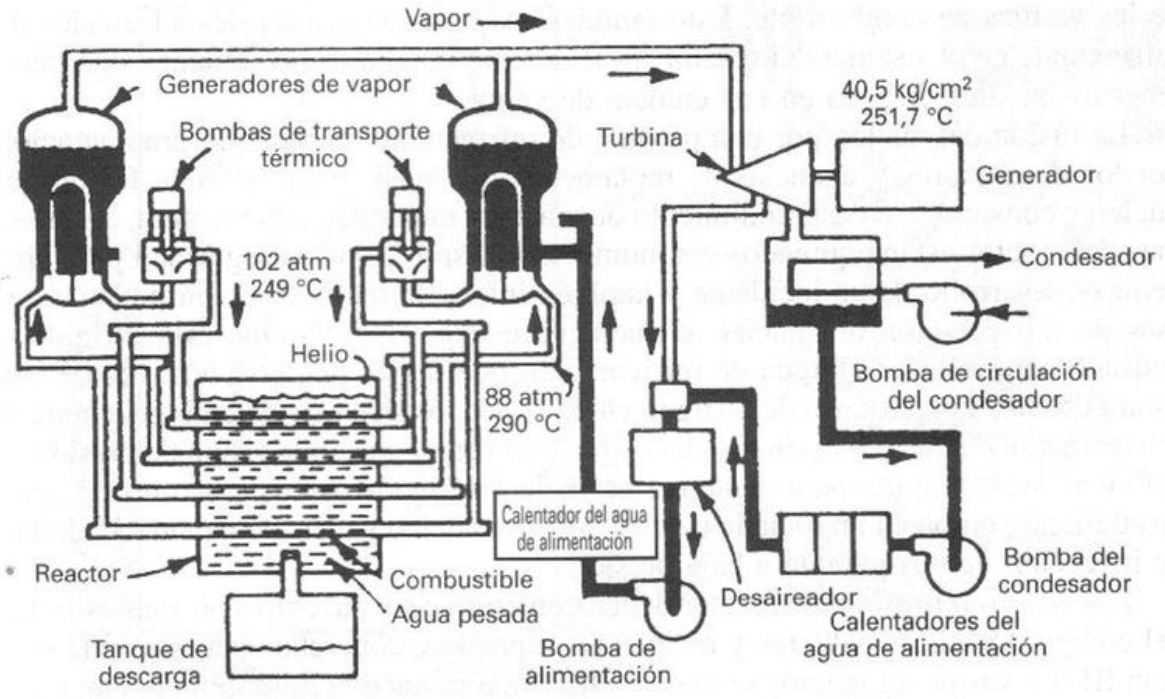
La Figura 5.4.*a* ilustra un esquema de reactor de agua pesada que asemeja al tipo de reactor PWR excepto en que, en este sistema, la transferencia de calor es desde los cilindros de combustible al refrigerante de agua pesada y después al agua ligera en generadores de vapor o cambiadores de agua a vapor. Este diseño es popular en Canadá.

La Figura 5.4.*b* ilustra un reactor enfriado por gas. Este sistema utiliza un gran compresor para circular de helio a través del núcleo del reactor y los generadores de vapor. El helio está a 700 psi (49 kg/cm^2) de presión absoluta y a una temperatura de 1.430 °F (776,7 °C), con el vapor producido a mayores temperaturas (1.000 °F = = 538 °C) y presiones que las que son posibles con los tubos de reactor BWR o PWR.

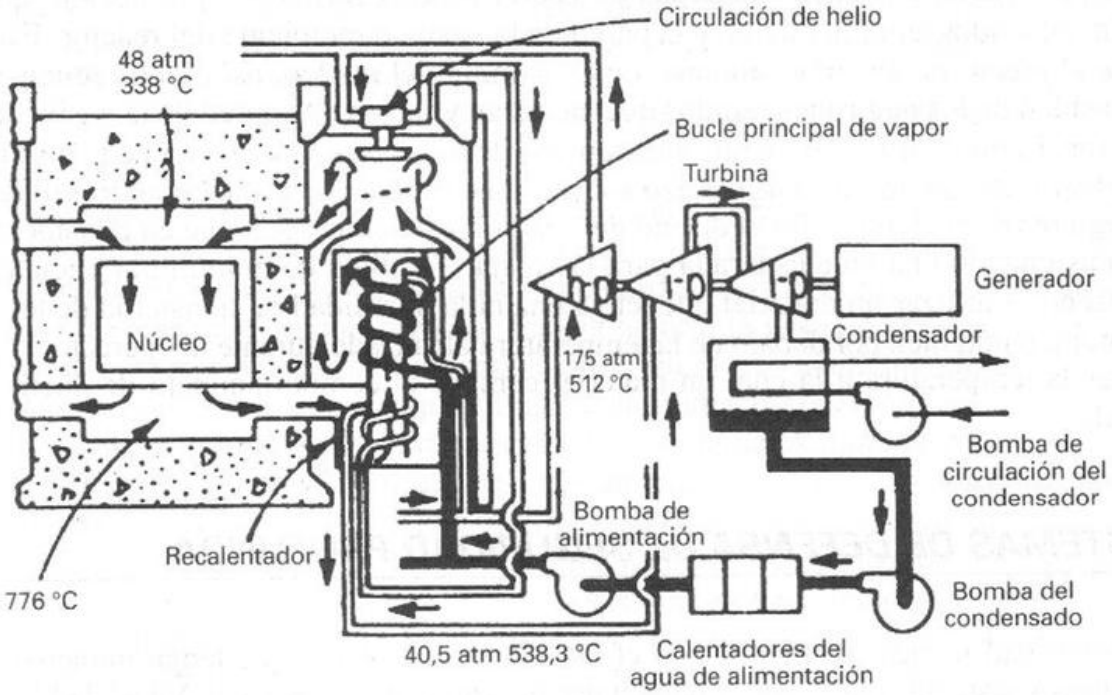
Están en desarrollo reactores patrón o patrones para generación eléctrica. El reactor padre o patrón es así llamado porque produce más combustible fisionable del material que consume. El ahora utilizado uranio 238 y los minerales de torio se convertirían en un reactor padre, a través del bombardeo de neutrones, en un combustible nuclear a partir del suministro menguante del combustible actual utilizado, uranio 235.

Las plantas de fusión están todavía en las etapas conceptuales y de desarrollo. La fusión requiere temperaturas hasta de 100 millones de grados Fahrenheit para los cuales no se conoce material que pueda resistirlas. Es necesario desarrollar intensos campos magnéticos para continuar y también para obtener el plasma de gas hidrógeno que es el combustible de la fusión. En el proceso de fusión el hidrógeno o sus isótopos deuterio y tritio son fundidos para formar helio, el elemento más próximo y mayor en la escala atómica. La unión o fusión tiene lugar en hornos nucleares que generan un intenso calor que debe ser extraído para la producción de energía útil. Un intenso desarrollo está teniendo lugar en todo el mundo en un esfuerzo por hallar un método económico de extraer energía útil a partir de una reacción de fusión nuclear.

Calor generado. El calor producido en un reactor nuclear se expresa usualmente en muchos megawatios de potencia. El calor producido depende del flujo térmico o flujo de neutrones desarrollado en la reacción nuclear en cadena por unidad de volumen, la energía producida por fisión y similares criterios físicos nucleares. Uno concerniente a los reactores nucleares, que es similar al caso de los generadores de vapor calentados por combustibles fósiles, es la posibilidad de daño por sobrecalentamiento. Los factores limitantes son los límites de temperatura impuestos sobre los conjuntos de combustibles para evitar el daño por sobrecalentamiento de las cubiertas del combustible y/o fusión del óxido de combustible. Estos factores también influyen en los caudales de refrigerante para evitar los daños por sobrecalentamiento



(*a*)



(*b*)

Figura 5.4. Esquemas de reactores de agua pesada y helio. (*a*) El reactor de agua pesada usa el flujo de agua a través de los tubos de las varillas de combustible y el agua pesada como moderador en el reactor. El helio se usa como colchón de expansión. (*b*) Este sistema de reactor enfriado por helio gas usa el helio como refrigerante y para los cambiadores de calor de vapor.

de las varillas de combustible. Esto también exige mantener niveles adecuados de refrigerante en el sistema del reactor, exactamente igual a como se tienen que mantener los niveles de agua en una caldera de vapor.

La fusión del núcleo por una pérdida de refrigerante ha recibido gran atención por los diseñadores y agencias de reglamentación legal. Para evitar la fusión del núcleo y consiguiente desprendimiento de material radiactivo a la biosfera, los sistemas del reactor están equipados con numerosos dispositivos de seguridad para prevenir el desarrollo de un incidente y también iniciar la realimentación de los sistemas de refrigeración del núcleo si fuera necesario. Este sistema está dirigido o pensado para rellenar el agua de refrigeración que puede perderse a través de una rotura del sistema primario de refrigeración. Todos los sistemas de emergencia de la refrigeración del núcleo están diseñados para inyectar agua en la vasija de presión lo suficientemente rápido para mantener el núcleo refrigerado. Los reactores de agua en ebullición emplean un rociado o *spray* sobre el núcleo y un sistema independiente de inyección de refrigerante a baja presión.

Las *vasijas a presión* del reactor deben construirse con arreglo a normas estrictas del código ASME de calderas y recipientes a presión, concretamente según la sección III. La vasija del reactor se vuelve altamente radiactiva durante la operación a causa de la captura de neutrones. Escudos macizos biológicos se usan para rodear la vasija a presión del reactor.

Los *escudos térmicos* son capas de acero, u otras formas de protección, que están colocados entre el núcleo y la pared de la vasija o recipiente del reactor. Esto tiene el efecto de absorber algunos rayos gamma del núcleo, así como reducir la intensidad de los neutrones rápidos que alcanzan y llegan a la pared de la vasija del reactor. El bombardeo con neutrones rápidos de la pared de la vasija puede producir efectos de radiación a largo plazo sobre el material de la vasija, como fragilidad a largo plazo de tiempo. En el diseño del reactor, este efecto se tiene en consideración asignando una vida esperada para la vasija. También de gran importancia en el diseño es utilizar un material que tenga una nula ductilidad de transición de temperatura, o ndt, bien por debajo de la temperatura alcanzada durante la operación. La ndt es la temperatura a la cual un material cambia su comportamiento de dúctil a frágil.

SISTEMAS DE DEFENSA DE SEGURIDAD PROFUNDA

La seguridad nuclear comienza con el diseño de una planta que tenga numerosas defensas y sistemas redundantes para evitar un accidente imprevisto. Véase la Figura 5.5. El diseño incorpora requerimientos estrictos de control de calidad que son, como mínimo, los requisitos legales. Los sistemas protectores incluyen dispositivos de instrumentación y medida que están constantemente vigilando y controlando zonas vitales de la planta y que son capaces de asegurar a la planta contra las anormalidades de operación. Los sistemas de seguridad múltiple se usan también para proteger la planta de los accidentes previstos. Véase la Figura 5.5.*a* que muestra un esquema del sistema en un reactor de agua en ebullición que proporciona una defensa contra el escape de material radiactivo del reactor al medio ambiente.

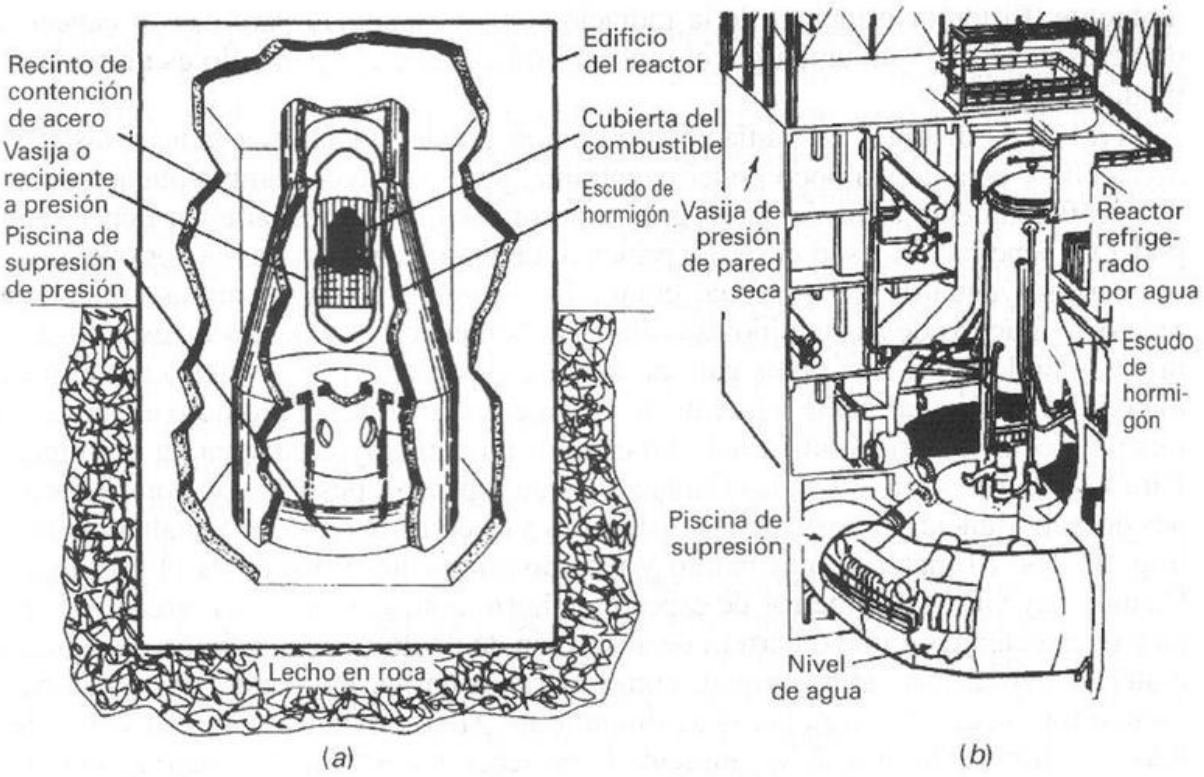


Figura 5.5. (*a*) La vasija del reactor está rodeada por una contención defensiva en profundidad. (*b*) Las piscinas sobrepresionadas se utilizan para condensar vapor de una fuga del reactor en la vasija de contención, lo cual limita las presiones y volúmenes requeridos en la vasija de contención.

La vasija de contención es una vasija de acero a presión de pared delgada cilíndrica o esférica rodeando el escudo protector. Su propósito es acomodar la energía desprendida por una fisión repentina e incontrolada en la eventualidad de un accidente del reactor. Como el personal trabaja dentro, la vasija debe estar provista de puertas y cierres de acceso. La presión en el interior se mantiene por debajo de la atmosférica de modo que cualquier fuga de gas radiactivo del reactor es retenida en la vasija y pasa a través de filtros especiales y conductos monitorizados.

El sistema de contención de presión-sobrepresión elimina la necesidad de una gran vasija de contención, al menos en el caso de los reactores enfriados por agua. En vez de ello, la vasija a presión del reactor y sus bombas y tuberías asociadas están encerradas en una segunda vasija a presión dimensionada para acomodar el vapor formado en la eventualidad de una rotura de tubería o vasija. Los conductos están conectados a esta vasija exterior. Conducen a una piscina anular en sobrepresión en la cual se condensa el vapor. Los productos arrastrados de la fisión son eliminados después por absorción.

Escudo térmico y biológico: riesgo de radiación. El riesgo de radiación en las plantas nucleares ha recibido amplia publicidad, pero la extensión de la exposición se hace significativa solamente cuando el cierre de la contención a presión se agujerea. Los problemas de disposición de los residuos están bajo control, pero el efecto a largo plazo del almacenaje es un tema que concierne a los especialistas del medio

ambiente. El temor principal de la radiación es su capacidad para causar cáncer y defectos genéticos; sin embargo, el umbral límite requerido para ello es un tema de medicina.

Tres tipos distintos de radiación se emiten por las sustancias radiactivas. Los rayos alfa y beta tienen poco poder penetrante, pero los rayos gamma pueden penetrar profundamente a través de un gran espesor. Los neutrones también tienen gran poder de penetración y son el riesgo principal de la radiación en un reactor operativo.

Para salvaguarda del personal contra los neutrones, rayos gamma y calor, el reactor y muchos de sus equipos auxiliares deben encerrarse dentro de escudos térmicos y biológicos. Los rayos gamma pueden absorberse por un cierto número de materiales, particularmente aquellos de gran densidad como el plomo o el acero. El mismo efecto se obtiene utilizando un espesor mucho mayor de agua en hormigón. Para los reactores terrestres, las limitaciones de espacio y peso no son consideraciones de importancia. El coste de los materiales y la construcción son usualmente más importantes. El material más barato y más ampliamente utilizado es el hormigón. Cuando hay varios decímetros de espesor de hormigón, se tiene una barrera biológica y un excelente escudo o barrera de absorción de neutrones. La adición de algunas materias más densas al hormigón, como hierro o barita, aumentará localmente el escudo o protección contra la radiación gamma. Alternativamente la utilización del más caro hormigón magnético aumenta la protección contra ambos rayos gamma y neutrones.

La intensidad de la radiación sigue la ley inversa del cuadrado de la distancia al foco, cuando esta distancia aumenta. Por otra parte, el monto o magnitud de la protección puede reducirse construyendo el escudo a una mayor distancia del núcleo. Como el hormigón no es capaz de soportar una gran cantidad de calor, se construye un escudo térmico entre el escudo principal y el reactor. Puede ser de acero o una vasija separada de hormigón delgado o fino. Deben preverse canales de refrigeración en la vasija de hormigón para eliminar el calor. El mayor problema es evitar los caminos de fugas de radiación por donde van las tuberías de entrada y salida del refrigerante, así como de las varillas de control y otros materiales que parten del reactor. Deben preverse unas etapas anulares para evitar una línea de perspectiva o camino directo.

Control e instrumentación. La energía potencial de la masa de combustible en un reactor nuclear y la actividad letal de muchos productos de fisión exigen unas medidas de seguridad más restrictivas que en una central convencional. Pueden considerarse bajo los puntos de vista claves: control e instrumentación para una operación segura del reactor y medios para evitar escapes de radiactividad durante la normal operación, posibles fugas del reactor u otro fallo.

La instrumentación del reactor puede agruparse en tres clases: control, seguridad y monitorización. Los mayores requerimientos en instrumentación y control es la medida y *display* de la tasa térmica producida en el núcleo en un rango completo desde la fase subcrítica hasta la operación a plena potencia. Esto se realiza midiendo el nivel de flujo o caudal de neutrones, o la tasa de fisión de neutrones, con detectores de neutrones. Se suministran diferentes tipos de instrumentación para el cierre o corte, arranque y operación a baja potencia y operación a elevada potencia.

Para las medidas de corte y arranque, se usan contadores de impulsos, a menudo tomando la forma de cámaras de ionización llenas de trifluoruro de boro gas. La operación a una tensión determinada, dará un pulso proporcional a la radiación incidente. Alternativamente, las cámaras de fisión, revestidas de un material fisible, son capaces de detectar neutrones por fisiones dentro de la cámara. Cada neutrón produce un impulso eléctrico. En otro caso, la producción (de neutrones) pasa por un amplificador de impulsos a medidores que cuentan la tasa en una escala logarítmica ya que el flujo o caudal de neutrones aumenta exponencialmente. En el arranque y fases similares de baja potencia los detectores se retraen dentro del escudo biológico hasta la operación a plena potencia. Para medidas de potencia en el rango normal de operación, cuando los efectos de la temperatura sobre la radiactividad se hacen importantes, los instrumentos están puestos a escala lineal. Las cámaras de ionización actúan directamente sobre los registradores potenciométricos de alta impedancia.

La caída en fase de emergencia o alarma de un reactor se basa en el ajuste de límites que son actuados por factores tales como el cambio de la densidad de neutrones, temperatura de los elementos de combustible, nivel de potencia y caudal de refrigerante. Entonces tiene lugar la alarma o «alarido» del reactor: las varillas de control se insertan automáticamente en el núcleo, bien por la potencia o bien por descarga del mecanismo de accionamiento, y se les permite caer por gravedad. Los tiempos de alarma son normalmente de 2 a 3 segundos.

La contención de los productos de fisión exige varias líneas de defensa. Por ejemplo, una vasija de reactor está rodeada por un sistema de escudos térmico y biológico. Una pared térmica de acero inoxidable protege el escudo del calor; el grafito boratado actúa como un absorbedor de neutrones. Los rayos gamma emitidos por el absorbedor son capturados en la virola o pared exterior de hormigón. Una piscina de supresión (Fig. 5.6.*b*) es una medida de seguridad para condensar el vapor si la vasija o tuberías de presión del reactor refrigerado por agua se rompe.

La monitorización del nivel de potencia del reactor es el propósito del detector de neutrones (contador de fisión o cámara de ionización) colocado dentro del núcleo (Fig. 5.6.*a*). Los detectores pueden colocarse alternativamente en el exterior del reactor, tratando el núcleo como foco o punto de emisión de neutrones, como se ve en la Figura 5.6.*c*. El extremo del rango del nivel posible de potencia requiere múltiples detectores con rangos solapados. Se pueden aplicar sensores de instrumentación del núcleo para obtener datos sobre combustible, transferencia de calor y características metalúrgicas.

El conjunto de instrumentación del combustible (Fig. 5.6.*b*) se utiliza en un reactor de agua en ebullición para determinar los límites de potencia del combustible.

REGLAMENTACIONES Y ADMINISTRACIÓN DE SEGURIDAD

Comisión Reguladora Nuclear (NRC). La Comisión Reguladora Nuclear del Gobierno Federal (EE. UU.), anteriormente llamada Comisión de Energía Atómica, ha potenciado ampliamente el uso de las plantas de generadores nucleares y ha esta-

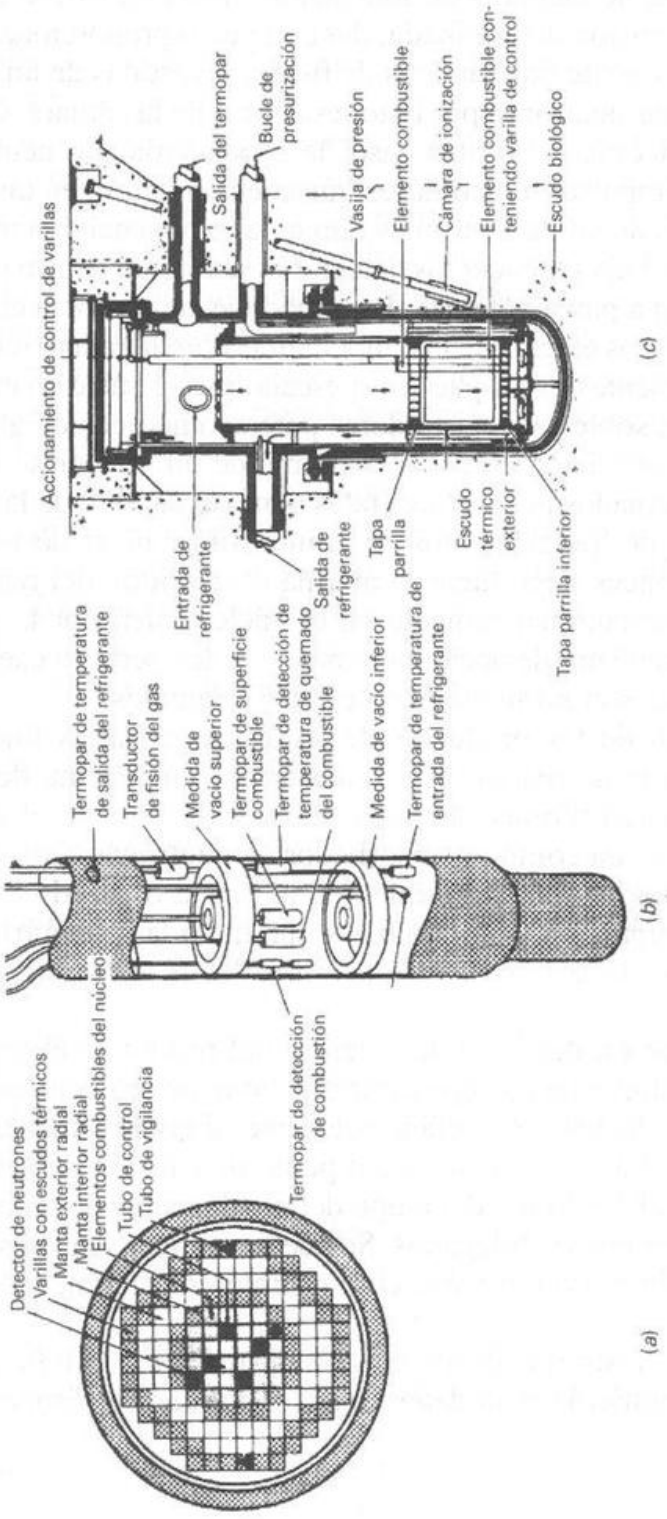


Figura 5.6. Se usan detectores para monitorizar el rendimiento del núcleo del reactor. (*a*) y (*b*) Detectores de neutrones para monitorizar el rendimiento del núcleo del reactor. (*c*) Los detectores están colocados al exterior del reactor para monitorizar el núcleo.

blecido una extensa inspección y controles administrativos que comprenden la mayor parte de las áreas afectadas por el uso de energía nuclear.

Se incluyen:

1. La propiedad del material combustible nuclear precisa una licencia del NRC, y esto se aplica a la organización que recibe, posea o fabrique combustible nuclear.
2. Las instalaciones nucleares deben tener licencia del NRC para la puesta en marcha con permiso de construcción, licencia de operación y operadores de plantas nucleares.
3. La NRC establece reglas sobre el manejo de residuos nucleares.
4. La NRC también establece límites y reglas para dosis de radiación permisible para los trabajadores de instalaciones nucleares y para el público en general.
5. Los requisitos mínimos del seguro son dictados por la NRC para las plantas nucleares.
6. Las líneas maestras amplias de operaciones, mantenimiento e inspección para plantas generadoras nucleares que implican medidas de seguridad son establecidas por el NRC.

Algunas responsabilidades sobre el uso de combustible y energía nuclear están divididas entre la NRC y varias agencias estatales, así como con otras agencias federales como la Comisión Interestatal de Comercio, Guardia Costera, Armada y Departamento de Trabajo.

Secciones nucleares del código ASME de calderas y recipientes a presión. Mediante adopción por requerimientos legales de las jurisdicciones federal y estatal, las secciones del código ASME que impliquen construcción nuclear e inspecciones de servicio han afectado materialmente la generación de energía nuclear así como las inspecciones periódicas de servicio de estas plantas.

El Comité Nacional de inspectores de calderas y recipientes a presión exige ahora a los inspectores relacionados con la construcción de vasijas o recipientes nucleares a presión e inspecciones de servicio recibir instrucciones especiales, sobre todo NDT (pruebas no destructivas) y pasar un examen para ser considerados como calificados nucleares en sus comisiones.

Secciones nucleares del código ASME. Hay un gran número de secciones que son aplicables a plantas de energía nuclear en lo que respecta a su construcción, instalación, control de calidad, informes sobre datos, documentación, inspección y pruebas no destructivas (NDT). Para ulterior estudio, he aquí una lista:

Sección III, subsección NCA: Requisitos generales para la División 1 y División 2.
Sección III, División 1.

Subsección NB: Componentes de la Clase 1.
Subsección NC: Componentes de la Clase 2.
Subsección ND: Componentes de la Clase 3.
Subsección NE: Componentes de la Clase MC.
Subsección NF: Soportes.

Subsección NG: Estructuras de soporte del núcleo.
Sección III, División 2. Código para vasijas de hormigón y contención al reactor.
Sección V: Exámenes no destructivos.
Sección XI: Reglas para inspección a servicio de componentes de plantas nucleares de energía.

Los inspectores del National Board que buscan un endoso o respaldo nuclear a su comisionado deben estar familiarizados con estas secciones que tratan con componentes de plantas de energía nuclear, así como el personal implicado con la operación mantenimiento e inspección de estas plantas.

Se ha adoptado un Código Nuclear aparte sobre recipientes a presión por las siguientes razones:

1. Los recipientes nucleares tienen muchas consideraciones de diseño inusuales que requieren reglas más restrictivas que las necesitadas para las calderas y otros recipientes a presión.
2. Hay varios tipos de vasijas nucleares, definidas como sigue: vasijas primarias, son aquellas sometidas o pertenecientes al refrigerante primario, que puede ser radiactivo; vasijas secundarias, que no están sometidas a radiactividad. Recipientes a presión son básicamente vasijas de contención para preservar contra la contaminación radiactiva en la eventualidad de fallo de las vasijas primarias.
3. Como una vasija de reactor nuclear puede estar radiactiva durante años, las inspecciones internas en el sentido usual, como se aplica a calderas y recipientes a presión, son imposibles. Tienen que emplearse sofisticados medios de pruebas por métodos no destructivos.
4. El riesgo en una vasija de un reactor nuclear es no sólo una explosión por presión, sino también un riesgo de contaminación radiactiva mucho más serio para la vida que una explosión de vapor solamente. Una zona o área completa puede verse afectada por un fallo nuclear. Así, son precisas unas reglas más restrictivas de diseño y fabricación que las requeridas para calderas o recipientes a presión.
5. Las vasijas del reactor nuclear pueden estar sometidas a cambios muy repentinos de temperatura de calefacción o refrigeración. Esto crea tensiones anormales y tensiones cíclicas de fatiga. El Código de calderas de potencia no tiene suficientes previsiones para calcular estas tensiones, pero el Código de recipientes nucleares exige que estas tensiones sean calculadas.
6. El material a utilizar en un recipiente o vasija nuclear puede tener que soportar los efectos de la radiación que pueden afectar a sus propiedades. Los materiales para vasijas nucleares requieren pues estas consideraciones, mientras los materiales para calderas y recipientes a presión pueden no requerirlos.
7. La inspección durante la fabricación de una vasija o recipiente a presión de un reactor nuclear tiene que ser mucho más profunda que la de una caldera a causa de los riesgos implicados. Un rígido control de calidad debe ejercerse mucho más allá de la práctica usual en la construcción de calderas y recipientes a presión.

Componentes de las clases 1, 2 y 3. El código ASME de construcción proporciona tres niveles de calidad para el diseño y construcción, dependiendo del riesgo radiactivo del elemento que pueda estar implicado con el componente sometido a consideración. La elección del nivel de calidad para un componente dado requiere un conocimiento de cómo funciona el componente en el proceso o sistema. Los componentes de la Clase 1 son los que forman parte del equipo de presión del refrigerante del reactor; por ejemplo, aquellos componentes que contienen el refrigerante para el núcleo y la tubería y componentes semejantes que no pueden aislarse del núcleo y de su radiactividad. Los componentes de la Clase 2 son aquellos implicados y relacionados con los sistemas auxiliares del reactor que no son parte del equipo relacionado con el refrigerante a presión del reactor, pero que están en comunicación directa con él, tales como el sistema de eliminación de calor residual. Los componentes de la Clase 3 son aquellos sistemas que soportan o ayudan a los componentes de la Clase 2 sin formar parte integrante de ellos.

El diseño de las vasijas de la Clase 1 es mucho más exacto en términos de requerimientos legales del Código que para las calderas convencionales. Un análisis de tensiones completo se requiere en todos los componentes principales de los recipientes de la Clase 1, y esto debe ser realizado por un ingeniero profesional colegiado. Todas las formas de tensión deben considerarse y combinarse para obtener la tensión real en cada sección crítica del recipiente o vasija. Esto incluye tensiones normales de cizalladura, discontinuidades, flexión, tensiones térmicas cíclicas y de fatiga.

Debe permitirse o añadirse un exceso por corrosión si el análisis muestra que así se requiere. Deben considerarse todas las condiciones de carga, incluyendo: (1) presiones interna, externa o su combinación; (2) peso de la vasija y de su contenido; (3) cargas impuestas, como las de otros recipientes, aislamiento, tuberías y recubrimiento; (4) cargas de viento, cargas de nieve y cargas sísmicas; (5) reacciones de los pies o ménsulas de soporte, anillos, cojinetes y otros soportes; (6) efectos térmicos de temperatura; y (7) efectos ambientales debidos a la radiación.

La tensión admisible de diseño está basada en la tensión elástica, no en la tensión de rotura, como es el caso de las calderas y recipientes a presión no calentados.

Los requisitos de soldadura son más duros. No se permiten anillos de refuerzo. Se requieren radiografías al 100 por 100 de todas las soldaduras sometidas a tensión producida por presión. Algunas soldaduras requieren también examen por ultrasonidos. El material debe estar certificado por el fabricante para cumplir con todas las secciones del Código de recipientes nucleares. Se exigen muestras del tratamiento térmico. Se requiere un examen ultrasónico para las chapas de acero de las vasijas de reactor y de todas las chapas de 4″ (100 mm) y más de espesor. Están establecidas normas para la técnica de ultrasonidos empleada. La prueba ultrasónica es por medio de un instrumento de impulsos y ecos.

Las piezas forjadas deben inspeccionarse ultrasónicamente y su superficie por el método de las partículas magnéticas. Las piezas forjadas de material no magnético deben examinarse superficialmente por el método de líquidos penetrantes. Las fundiciones deben examinarse por métodos radiográficos, ultrasónicos, partículas magnéticas y líquidos penetrantes.

Las tuberías, portalones y accesorios deben examinarse en toda su longitud por medio de radiografías, ultrasonidos, partículas magnéticas, líquidos penetrantes o de

corrientes vagabundas, basados en el material a examinar. Los tornillos, tuercas y material similar debe examinarse por el método húmedo de partículas magnéticas o por el método de líquidos penetrantes. Los aceros al carbono, aceros aleados y aleaciones de cromo deben someterse a varias pruebas de impacto para determinar temperatura de ductilidad nula y fragilidad.

Durante la fase de fabricación, es importante mantener registros completos y detallados de todas las inspecciones, para asegurarse de que se realizaron en un tiempo adecuado, con la secuencia adecuada y no después del hecho y sobre todo el material de construcción.

Pruebas. Debe hacerse la prueba de las chapas de la vasija del reactor. El procedimiento de soldadura y los métodos no destructivos usados en los exámenes deberán ser los mismos que los usados en la fabricación de la vasija. Deben tomarse especímenes de prueba. Está estipulada una prueba hidrostática final de $1^1/_4$ veces la presión de diseño. Deben realizarse pruebas neumáticas en lugar de la prueba hidrostática.

Bombas y válvulas. El código ASME tiene también requisitos para las válvulas y bombas implicadas y relacionadas con la refrigeración del reactor. El propósito principal de las inspecciones y pruebas requeridas por imperativo legal es dar la seguridad de que las válvulas y bombas asociadas y usadas con los sistemas del reactor tendrán la integridad para trabajar según diseño y bajo condiciones normales y de emergencia de modo que el refrigerante sea suministrado al reactor para un corte u operación seguros. Entre los requisitos para válvulas y bombas están:

1. Todas las válvulas que tengan dispositivos en lugares remotos para indicar si están abiertas o cerradas deben ser probadas a intervalos definidos para asegurarse de que los dispositivos indicadores están operando correctamente.
2. Se exige el ejercicio regular de las válvulas para asegurarse de que se abren y cierran adecuadamente y de que no están congeladas.
3. Las bombas deben hacerse funcionar periódicamente para asegurarse de que están operativas cuando se necesiten.
4. Debe existir socorro eléctrico en caso de corte eléctrico en el lugar, como un generador diesel y éste también debe probarse a intervalos estipulados para notar si está listo para uso de emergencia.

Marketing, estampillado e informes. Los cálculos y especificaciones de diseño deben ser cumplidos con la aprobación de las autoridades estatales u oficiales responsables, en el lugar de la instalación, para recipientes y calderas nucleares. Las especificaciones de diseño deben estar certificadas de acuerdo con el Código y adecuación para el uso, según clasificación de recipientes, con un informe detallado sobre las condiciones de trabajo esperado y que se han de cumplir de forma que pueda hacerse una evaluación completa del diseño según el Código por un profesional registrado y cualificado en diseño de recipientes a presión. Las vasijas a presión deben ser inspeccionadas durante la construcción e instalación por un inspector nuclear calificado según el código ASME nuclear. Deben incluirse todas las hojas de

datos necesarias. Los recipientes deben marcarse con el símbolo «N» de nuclear y con la siguiente información: (1) clase de recipiente; (2) fabricante; (3) presión de diseño y temperatura coincidente; (4) número de serie del fabricante; y (5) año de construcción.

Certificados de autorización. El código ASME para componentes de plantas de energía nuclear exige certificados de autorización a obtener y retener por las siguientes organizaciones que pueden estar en activo en el trabajo de una planta de energía nuclear: fabricantes, organizaciones de ingeniería, fabricantes de equipo, instaladores, fabricantes y suministradores de materiales de construcción, propietarios y agentes de una planta propuesta. La idea y propósito de certificación es tener un programa de aseguramiento de calidad de todas las organizaciones acreditadas que pueden cumplir un cierto mínimo de normas del Código. La última idea es que todo trabajo realizado será dirigido en total y rígido acuerdo y cumplimiento de norma y especificaciones así como procedimientos, que todas las actividades críticas serán verificadas por personal cualificado de una organización independiente de ejecución de trabajo (programa de inspección por una tercera parte), que las medidas y resultados de las pruebas estarán totalmente documentados y analizados en conformidad con las especificaciones establecidas y requisitos del Código y que retomarán las acciones apropiadas para excluir la recurrencia de discrepancias y deficiencias. A la mayoría de los detentadores del certificado se les exige tener un manual de aseguramiento de la calidad. Este documento se mantendrá al día y deberá explicar con detalle el sistema de fabricación controlada que se está siguiendo para alcanzar el cumplimiento de las especificaciones del Código legal.

Agencias de inspección. Otro documento que afecta a la construcción de plantas de energía nuclear es el ANSI N626 (American National Standard Institute, ANSI) titulado «Cualificación y deberes para la inspección nuclear autorizada» que ASME ha adoptado también como un requisito suyo. Este documento define las agencias de inspección autorizadas, así como a los inspectores y supervisores nucleares autorizados. Se ha puesto gran énfasis en el conocimiento de la soldadura y de cómo puede afectar a los metales en los exámenes dados o hechos a los potenciales inspectores nucleares. El conocimiento de interpretación del método NDT, así como la interpretación de resultados, son también muy resaltados en los requisitos. Los procedimientos de control de calidad en la monitorización del tema de la construcción están también enfatizados en los deberes de un inspector nuclear, como son el seguimiento de documentación sobre materiales, procedimientos de soldadura, cualificación de soldadores y áreas similares donde puedan existir variables en la construcción.

Inspecciones básicas. El Código exige exámenes e inspecciones iniciales in situ sobre los componentes de una planta nuclear antes de efectuar ninguna operación. Estas inspecciones deben estar totalmente documentados para futuras referencias y deben constar de métodos de examen visual, NDT y cualesquiera otros métodos que puedan ser duplicados o comprobados en el futuro de la operación de la planta. El examen periódico y las pruebas están estipuladas en el Código o por el NRC. Se requiere que los elementos componentes de la zona radiactiva primaria, como mínimo, sean inspeccionados a intervalos de 10 años.

Inspección en servicio: Sección XI. El objetivo principal de la Sección XI del código ASME es proporcionar medios para asegurar que la integridad mecánica del sistema refrigerante primario se mantiene a través de la vida operativa de la instalación. Este objetivo se cumple a través del requerimiento para la conducción de un mínimo de inspecciones periódicas de componentes nucleares críticos, como los recipientes de la Clase 1 y sus zonas de soldadura y otras zonas altamente tensionadas. Se requiere un servicio previo de inspección. Usualmente se utilizan las técnicas de inspección ultrasónicas, ya que pueden duplicarse más tarde durante las reinspecciones exigidas. Esto permite hacer comparaciones para anotar cambios. Los dispositivos automáticos de inspección se utilizan siempre que sea posible. El uso del equipo de inspección operado remotamente bajo procedimientos adecuadamente planeados ha reducido el riesgo a los equipos de examen e inspección. La frecuencia de las inspecciones y los criterios aceptables están detallados en el código ASME para componentes de plantas de energía nuclear. Los mecanismos de fractura se usan para analizar la seriedad de las grietas allí donde no existe normativa legal de Código.

Las agencias de inspección y las autoridades jurisdiccionales son notificadas si se hallan condiciones que requieren aprobación para reparaciones o cambios. Por ejemplo los problemas de tubos del generador de vapor, en forma de degradaciones tales como corrosión por tensiones y erosión, se han detectado por el uso de métodos de inspección mediante corrientes vagabundas sobre los tubos en U en el generador de vapor en plantas de agua presurizada. Este programa de pruebas sobre la marcha ha dado por resultado el cambio del material original de los tubos de acero inoxidable a Inconel 600, una aleación de Ni-15Cr-9Fe, y a la práctica actual en EE. UU. de usar Inconel 690TT, una aleación de Ni-30Cr-10Fe con tratamiento térmico. Estos tipos de problemas están siendo resueltos como resultado de los programas de inspección en servicio.

Cualificaciones del operador. Las cualificaciones y entrenamiento de los operadores están gobernados y determinados por requisitos federales. Los criterios para la selección y adiestramiento de personal de plantas de energía nuclear están contenidos en la Norma Nacional Americana 3.1-1978 titulada «Selección y adiestramiento de personal de plantas de energía nuclear». La mayoría de plantas nucleares requieren una mínima presencia durante la operación de al menos un operador de reactor senior, dos operadores de reactor y dos operadores auxiliares que pueden no tener aún su licencia. El entrenamiento de un operador está recibiendo una atención cada vez mayor, ya que es necesario como soporte para ayudar al ingeniero de seguridad a suplementar el equipo de operaciones en caso de desarrollarse una situación de emergencia durante la operación. Las muchas válvulas y subsistemas que hay en una planta de energía nuclear así como los controles eléctricamente activados requieren un amplio conocimiento de la interrelación entre los sistemas. Véase la Figura 5.1. Las muchas bombas y válvulas señaladas pueden conducir a errores de apertura y cierre de válvulas y también aumentar la posibilidad de fallos eléctricos y mecánicos. La confianza total en los sistemas de redundancia automática no puede anticipar todas las posibilidades de mal funcionamiento o sensación de que un mal funcionamiento está teniendo lugar; por otra parte, se necesitan operadores diestros, bien versados y entrenados en los requerimientos del diseño y operación de plantas de energía nuclear.

Personal de pruebas no destructivas. El personal de pruebas no destructivas debe estar cualificado y estas cualificaciones están graduadas como sigue:

— Una persona de Nivel 1 debe tener experiencia o entrenamiento en la realización de inspecciones y pruebas que a él o ella se le van a exigir. Esta persona deberá estar familiarizada con las herramientas y equipo a emplear y deberá tener y demostrar aprovechamiento en su utilización. Él o ella deberá estar familiarizado/a con el equipo de inspección y medida así como con los métodos de calibración y control y ser capaz de verificar que el equipo está en unas condiciones adecuadas para su utilización.
— Una persona de Nivel 2 debe tener experiencia y preparación en el trabajo de las inspecciones y pruebas requeridas y en la organización de evaluación de los resultados de las inspecciones y pruebas. Esta persona debe ser capaz de supervisar y mantener vigilancia sobre las inspecciones y pruebas llevadas a cabo por otros y ser capaz de calibrar o establecer la validez de la calibración de inspecciones y equipos de medida. Él o ella tendrá y habrá demostrado tener aprovechamiento en la planificación y ajuste de pruebas y será capaz de determinar la validez de los resultados de las pruebas.
— Una persona de Nivel 3 debe tener amplia experiencia y adiestramiento formal en la ejecución de inspecciones y pruebas y deberá estar formada a través de cursos de estudio en los principios y técnicas de las inspecciones y pruebas que se van a realizar. Esta persona deberá ser capaz de planificar y supervisar inspecciones y pruebas, revisar y aprobar procedimientos y evaluar la adecuación de las actividades para cumplir los objetivos. Él o ella deberá ser capaz de organizar y presentar resultados y de certificar la validez de los resultados.

El personal implicado en la realización, evaluación o supervisión de pruebas no destructivas, incluyendo métodos de radiografía, ultrasonidos, penetrantes, partículas magnéticas o corrientes parásitas, debe cumplir la calificación de Nivel 3 especificada en la norma SNT-TC-1A de la ASME para NDT y suplementos. Aquellas personas implicadas en el rendimiento, evaluación y supervisión de métodos de prueba de fugas de gas deben cumplir las cualificaciones requeridas especificadas para una persona de Nivel 2.

El personal que tiene asignadas la responsabilidad y autoridad para realizar funciones de proyecto debe tener como mínimo el nivel de capacidad mostrado en la Tabla 5.1. Cuando las inspecciones y pruebas están complementadas por equipos o grupos de individuos, el responsable debe participar y debe cumplir las cualificaciones mínimas indicadas.

Debe establecerse y mantenerse un seguimiento del registro de las cualificaciones del personal por la propiedad. Este seguimiento debería contener registros de realizaciones pasadas, arriostramiento, evaluaciones inicial y periódicas y certificación de las cualificaciones de cada persona.

Protección contra incendios. Se requieren medidas extra para evitar cualquier incendio que pueda afectar al sistema de seguridad de la planta debido al riesgo de radiación. La propiedad y los consorcios de seguros que proporcionan garantía y

Tabla 5.1. Niveles mínimos de capacidad para funciones de proyecto

Función del proyecto	Nivel		
	1	2	3
Aprobación de procedimientos de prueba e inspección			X
Implementación de procedimientos de prueba e inspección	X		
Evaluación de resultados de pruebas e inspección		X	
Informe de resultados de pruebas e inspección		X	

cubren el seguro para centrales nucleares han sido muy activos en la realización de inspecciones y presentación de recomendaciones para cualquier tipo de riesgo y de ese modo tienen inspectores de NRC.

Se ha dado mucha importancia y énfasis al suministro de barreras de no menos de tres horas de tarado para separar las siguientes zonas críticas en una central nuclear: edificio de administración, salas de baterías, calderas utilizadas para el arranque, penetraciones de cables en el edificio del reactor y salas de control u otras zonas que comprometen la instalación, ejes de cables, túneles de cables, salas de ordenador, edificio o sala de control, zonas de descontaminación, salas de bombas de incendios, zona de interruptores y todas las otras zonas incluyendo el edificio del turbogenerador, si hay riesgo para la instalación. La misma filosofía se aplica al uso de rociadores (*sprinklers*) o supresión del fuego mediante halón.

El residuo nuclear de alto nivel es un problema severo de disposición en lo que concierne al medio ambiente por muchas autoridades y jurisdicciones federales y estatales (así en EE. UU. como en España). Todavía en etapa de desarrollo hay un sistema para convertir residuos líquidos en un sólido e inmovilizar este sólido en vidrio para enterrarlo a gran profundidad, en minas subterráneas en zonas remotas fuera de todo entorno habitado humano.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

1. ¿Cómo se detecta la radiactividad?

RESPUESTA: Los instrumentos normalmente utilizados son los contadores Geiger-Müller, contadores de chispas, medidores de vigilancia de rayos gamma y contadores proporcionales. El instrumento a utilizar depende del tipo y densidad de la radiación a medir. Los contadores Geiger-Müller se utilizan para detectar radiación beta y gamma, pero no son efectivos para medir la radiación alfa.

2. ¿Qué es la radiación cuando se aplica a centrales nucleares?

RESPUESTA: Los isótopos inestables de ciertos elementos químicos que sufren cambios espontáneos en la estructura atómica del elemento. Este cambio se denomina degradación radiactiva. Mientras este fenómeno tiene lugar, se emite radiación de energía; así, el término radiación de partículas describe la radiación que se experimenta en una planta de energía nuclear, principalmente bajo condiciones controladas en la vasija del reactor presurizada.

3. ¿Cómo se define un isótopo?

RESPUESTA: Isótopos son elementos que tienen el mismo número de protones, pero difieren en el número de neutrones de su núcleo. Los isótopos de un elemento tienen las mismas propiedades químicas y algunas de las mismas propiedades físicas, pero tienen diferentes pesos atómicos como resultado de la diferencia del número de neutrones en el núcleo.

4. ¿Qué es la vida media de una sustancia radiactiva?

RESPUESTA: Vida media se define como el tiempo requerido para que una sustancia radiactiva alcance la mitad de su intensidad emisora de radiactividad.

5. ¿Qué unidades se usan para medir la radiactividad?

RESPUESTA: El roentgen (R) es la unidad más frecuentemente usada para medir la cantidad de radiación que emana de un cuerpo. Se usa principalmente para medir rayos X y rayos gamma. Un roentgen es la producción de $2{,}58 \times 10^{-4}$ culombios por kilogramo de aire (C/kg). Las tolerancias de exposición se expresan usualmente en milirroentgen (mR) o una milésima de roentgen. La radiactividad de un material que está sufriendo degradación radiactiva (o desintegración radiactiva) se expresa en curios (Ci), que es igual a $3{,}7 \times 10^{10}$ desintegraciones por segundo.

6. ¿Cómo se definen la radiación alfa, beta y gamma?

RESPUESTA: La radiación de partículas alfa consta de dos protones y dos neutrones. Esto las hace idénticas al núcleo del átomo de helio cargado positivamente. No pueden penetrar la piel humana, pero son peligrosas para la salud humana si se inhalan o ingieren por el cuerpo humano. Esto puede ocurrir por inhalar polvo portador de radiación alfa o comer alimentos o agua contaminados por la radiación alfa.

Las partículas beta son electrones de alta velocidad con poder penetrante suficiente como para penetrar en el aluminio hasta 1″ (25,4 mm) de espesor. Así que son un riesgo para la salud del cuerpo humano.

La radiación gamma es un tipo de rayos electromagnéticos similares a la luz, ondas de radio y rayos X con una velocidad que se aproxima a la de la luz. Su poder de penetración puede alcanzar hasta 3 pies (0,9 m) en el hormigón. Esta radiación es la más peligrosa para la salud humana en la operación de plantas nucleares.

7. Cite algunos métodos típicos empleados para proteger a los trabajadores de las dosis excesivas de radiación.

RESPUESTA: Algunos factores típicos considerados en el esquema protector son generalmente los siguientes:

1. Controlar la duración de toda exposición.
2. Controlar la distancia entre el cuerpo humano y la fuente de radiación.
3. Colocar un escudo entre el cuerpo y la fuente de radiación.
4. Establecer un estricto y preciso programa de monitorización de la radiación en la zona de trabajo.
5. Tener servicios médicos disponibles en todo momento para tratar cualquier exposición accidental bajo los niveles normales estipulados.

8. ¿Qué procedimientos se siguen generalmente para descontaminar material radiactivo?

RESPUESTA: El material radiactivo no puede ser destruido. Además el proceso de descontaminación implica uno de los siguientes métodos de aminorar el riesgo de radiactividad:

1. Aislar la zona de contaminación radiactiva hasta aquel momento en que la radiactividad haya decrecido hasta un nivel seguro como resultado de la desintegración radiactiva. La vida media del contaminante influirá en este proceso.
2. Trate la superficie de modo que el material radiactivo sea absorbido, limpiado, barrido, etc., y después llevado a un lugar donde la sustancia radiactiva no sea un riesgo para la gente. La descontaminación más difícil es aquella en que el contaminante se absorbe en un material poroso como el hormigón. Completar la eliminación de muros, suelos y zonas contaminadas similares puede ser necesario bajo este tipo de contaminación.

9. ¿Qué es un escudo térmico en un reactor nuclear?

RESPUESTA: El escudo térmico usualmente consta de chapas de acero rodeando al núcleo en la vasija del reactor de modo que se conserve el calor y se reduzca la temperatura y tensiones térmicos en la pared de la vasija del reactor. La capa interior del escudo próxima al núcleo está sometida a una intensa radiación de neutrones y radiación gamma, que se convierte en calor. El escudo térmico a menudo está refrigerado por la circulación del agua.

10. ¿Qué es un escudo biológico?

RESPUESTA: El escudo biológico consiste en hormigón de alta densidad o chapas de plomo que rodean al reactor. Evita el escape de neutrones y radiación fuera de la pared del recipiente y protege así al personal. La radiación está presente en los períodos de operación y cierre o corte a causa de la radiactividad de los elementos de combustible.

11. ¿Qué es una vasija o recipiente de contención?

RESPUESTA: Para evitar la salida de los productos de fisión en caso de una fusión del combustible o explosión del reactor primario, la mayoría de los reactores de potencia están alojados en contenedores de acero estancos. No están presurizados normalmente, pero están diseñados para soportar la máxima presión u ondas de choque que se pueden desarrollar como consecuencia de un accidente. Los componentes radiactivos primarios están usualmente dentro de la vasija de contención.

12. Cite los tipos de reactores posibles, según el refrigerante utilizado

RESPUESTA: De las muchas disposiciones posibles de combustible fisionable y fértil moderador y refrigerante que pueden constituir un sistema de reacción en cadena, han sobresalido seis tipos como principales contendientes para la generación de energía eléctrica a escala total:

1. Agua presurizada.
2. El relacionado muy de cerca con el anterior que es el de agua en ebullición.
3. El refrigerado por sodio y con grafito de agente moderador.
4. Refrigerado por gas.
5. Enfriado por agua pesada.
6. Reactores refrigerados por sustancias orgánicas y moderados por agua pesada.

13. ¿Qué son varilla de relleno y varilla de alarma, aplicados estos términos a una planta nuclear?

RESPUESTA: Una varilla de relleno es una varilla de control utilizada para realizar ajustes groseros en la reactividad de una reacción en cadena; mientras que la varilla de

regulación hace los ajustes finos de la reactividad. El control del reactor se alcanza también variando el nivel de líquido en aquellos reactores que utilizan un líquido como moderador de reactividad. Una varilla de alarma es una varilla de seguridad que es capaz de cortar o cerrar un reactor rápidamente en la eventualidad de que la varilla de control o relleno fallen en su cometido de controlar la reactividad dentro de los límites prescritos.

14. ¿Qué se entiende por el término «veneno»?

RESPUESTA: El término «veneno» se aplica a los productos de fisión de los elementos de combustible de un reactor que absorbe neutrones y así afecta a la reactividad del reactor. Los dos productos más prominentes de fisión considerados «venenosos» son el xenón 135 y el yodo 135. Estos elementos se producen cuando el reactor usa uranio. El veneno formado como productos de fisión eventualmente reduce la salida del reactor; como resultado, los elementos de combustible se gastan, lo que eventualmente exige la recarga (de combustible) del reactor. El «veneno» puede también inyectarse en un reactor para producir la alarma o cierre bajo condiciones críticas de emergencia.

15. ¿Qué es un material fértil?

RESPUESTA: Es un material que es capaz de capturar neutrones y después hacerlos fisionables. Otro término para convertir material fértil en fisionable es «crianza». Como por ejemplo, el torio 232 se puede convertir en uranio 232 por bombardeo nuclear.

16. ¿Cómo se pierde o gasta el combustible procesado?

RESPUESTA: El combustible gastado se envía a una planta o fábrica de reprocesamiento. El revestimiento del combustible se trocea para lixiviar uranio, plutonio y otros productos de fisión. El uranio y el plutonio son reparados y se retornan al ciclo de combustible para su reutilización. Los componentes restantes son estroncio 90 y cesio 137, con vidas medias de aproximadamente 30 años. También está presente algo de plutonio con vida media de 24.000 años. El líquido residual se convierte en sólido y después se encierra en contenedores estancos para su eventual embarque a un depósito federal (estatal, en España) bajo control perpetuo del gobierno.

17. ¿Qué es un dosímetro digital audible?

RESPUESTA: Es un instrumento que proporciona una medida inmediata de la exposición a la radiación en la zona; así como también una alarma personal audible de que existe una exposición a la radiación. Es posible ajustar los puntos o consignas de alarma.

18. ¿Cuáles son las funciones principales de una agencia de inspección autorizada en un trabajo de una planta de energía nuclear?

RESPUESTA:

1. Participar en los controles ASME y vigilancia de cualquier organización que tenga un sello de código nuclear y para la cual la agencia de inspección autorizada tiene que estar el servicio de inspección de los componentes legales de la planta.
2. Mantener un equipo cualificado de supervisores de inspección nuclear que monitorice los talleres con los cuales se ha hecho un acuerdo de inspección para dar las inspecciones requeridas según el Código legal.
3. Suministrar instrucciones documentales a los inspectores nucleares autorizados de la agencia de inspección sobre procedimientos a seguir durante la ejecución rutina-

ria y cuando la asistencia o guía pueden necesitarse por sus supervisores para cumplir con los requisitos nucleares.

19. ¿Cite las funciones clave de un inspector nuclear que está haciendo su trabajo según los requisitos del código ASME nuclear?

RESPUESTA:

1. Verificar qué trabajo se está haciendo por los fabricantes e instaladores que tienen el certificado ASME de autorización para realizar el trabajo.
2. Monitorizar el programa de aseguramiento de calidad del fabricante para ver si se está siguiendo correctamente.
3. Verificar que todos los metales utilizados cumplen los requisitos del Código por lo que se refiere a datos, sellos y traceabilidad.
4. Verificar que todas las soldaduras se están realizando con procedimientos cualificados y que los soldadores empleados están cualificados según el Código.
5. Mantener un registro escrito de la actividad inspectora.
6. Verificar que los cálculos de diseño han sido hechos según el Código y están disponibles para revisión.
7. Verificar que todos los tratamientos térmicos han sido ejecutados adecuada y correctamente.
8. Verificar e interpretar todos los exámenes no destructivos necesarios y requeridos por el Código.
9. Atestiguar las pruebas hidrostáticas o neumáticas requeridas.
10. Atestiguar y verificar que las chapas estampilladas cumplen con las especificaciones y requerimientos del Código.
11. Firmar los documentos necesarios como se requiere según el Código normativo para demostrar que las partes o piezas componentes cumplen los requisitos normativos y legales.

20. ¿A qué parte de las bombas de centrales nucleares está dirigido o enfocado el código ASME?

RESPUESTA: Las normas ASME para bombas nucleares se centran en los *casings* o envolventes, entradas y salidas de bombas, cubiertas, anillos de pinzado, alojamiento de sellos, tornillería, enfriadores internos de las bombas, tuberías agregadas a las bombas (difusores), tuberías conectadas y soportes.

21. ¿Cómo se define el código ASME a un propietario o propiedad de una central de energía nuclear?

RESPUESTA: El Código reconoce que en el campo de la instalación hay muchas compañías de instalaciones operando. La palabra propietario o propiedad se estipula que es una organización responsable de la operación, mantenimiento, seguridad y generación de energía de la planta nuclear.

22. ¿Con qué norma debe estar cualificado el personal que realiza los exámenes de técnicas no destructivas?

RESPUESTA: Debe estar cualificado para la técnica y método a utilizar de acuerdo con la norma SNT-TC-1A titulada «Práctica recomendada para cualificación y certificación del personal en técnicas NDT». Si esta norma no cubre el examen propuesto, entonces el personal de NDT debe estar cualificado para el examen particular por el fabricante o contratista.

23. ¿Quién audita a los operadores de técnicas NDT?

RESPUESTA: El inspector autorizado tiene que verificar que los operadores de técnicas NDT han sido certificados de acuerdo con la norma SNT-TC-1A. El inspector tiene la prerrogativa de auditar el programa de examen de técnica NDT in situ de modo efectivo. Cuando el inspector autorizado tiene razones para cuestionar el rendimiento de un operador de técnica NDT, él o ella pueden requerir la recalificación del operador en el procedimiento escrito requerido para el examen particular.

24. ¿Cuánto tiempo deben permanecer expuestas las juntas o uniones soldadas de un componente o pieza nuclear de la Clase 1?

RESPUESTA: Deben permanecer sin aislamiento y expuestas para su examen por el inspector autorizado para ver si existen fugas durante toda la prueba hidrostática de presión.

25. ¿Qué prueba hidrostática de presión se exige a los componentes según la Sección III, Clase 1?

RESPUESTA: Los componentes completos y piezas relativas excepto juntas reforzadas en uniones, bombas y válvulas deben someterse a una prueba hidrostática de presión no menor de 1,25 veces la presión de diseño del sistema. Las juntas o uniones reforzadas, bombas y válvulas deben probarse hidrostáticamente a una presión 1,5 veces la presión de diseño del sistema.

26. ¿Cómo se especifica la capacidad total de descarga de los componentes de los dispositivos de descarga especificados en la Clase 1?

RESPUESTA: La capacidad total de descarga de los dispositivos de descarga de presión debe ser adecuada para evitar un aumento de presión superior al 10 por 100 de la presión y temperatura de diseño del sistema dentro de los confines de retención de presión del sistema nuclear.

27. Además de las válvulas cargadas a resorte, ¿qué otro tipo de válvulas de seguridad pueden utilizarse en los sistemas de la Clase 1?

RESPUESTA: Las válvulas de seguridad actuadas por presión piloto y las válvulas de seguridad actuadas eléctricamente, supuesto que cumplan los requisitos de instalación del Código.

28. ¿Qué se consideran indicaciones de grietas cuando se está realizando un examen de técnica NDT durante las inspecciones en servicio de una planta de energía nuclear?

RESPUESTA: Las evidencias o señales de instrumentos que revelen lo siguiente: grietas, inclusiones de escoria, segregaciones de material, porosidad en línea o arracimada, falta de penetración de soldadura, y laminaciones de la chapa.

29. Diferencias entre examen de superficie y examen volumétrico.

RESPUESTA: El examen de superficie comprende el método del líquido penetrante y el examen con partículas magnéticas. Se utiliza para verificar la superficie o grietas o discontinuidades cerca de la superficie. El examen volumétrico se hace con el objeto de determinar las discontinuidades debajo de la superficie de modo que pueda examinarse en una extensión que comprenda el volumen total de metal por debajo de la superficie.

Los dos métodos principales de examen usados son el examen radiográfico y las pruebas con ultrasonidos.

30. Cite los cinco componentes principales de una planta PWR de energía nuclear.

RESPUESTA:

1. Reactor nuclear.
2. Generadores de vapor o intercambiadores de calor.
3. Tubería para circular el refrigerante entre el reactor y los generadores de vapor.
4. Bombas para circular el refrigerante.
5. Presurizador para evitar que hierva el refrigerante y permitir cambios de volumen en el refrigerante sin excesivo aumento de la presión con cambios en la temperatura del refrigerante.

31. ¿De quién es la responsabilidad de establecer los procedimientos adecuados para los exámenes NDT cuando una referencia a una sección del Código, como la de la Sección III, exige un examen NDT?

RESPUESTA: La responsabilidad de establecer procedimientos adecuados de examen y realizar los exámenes NDT por personal cualificado de acuerdo a los requisitos de la sección del Código es del fabricante del recipiente o caldera o del constructor si es distinto del fabricante, o del instalador según la normativa del recipiente o caldera.

32. ¿Qué es una supresión de la presión de contención?

RESPUESTA: En una supresión de la presión de contención, el reactor es una vasija a relativamente poca presión, llamada el pozo seco, que está conectado por tuberías de venteo a una segunda vasija que está parcialmente llena de agua, llamada la piscina de supresión. Si un sistema del reactor tiene una fuga repentina, como una rotura de tubería en el pozo seco, el vapor desprendido del sistema del reactor se dirige a la piscina de supresión, por los tubos de venteo, y se condensa allí. La ventaja de este sistema es que la estructura de contención puede tener menos volumen y/o menor presión de diseño que la que sería necesaria para una vasija de contención de presión similar.

33. ¿Sobre qué bases se diseñan las estructuras de contención a presión?

RESPUESTA: Éstas se diseñan para contener la energía y productos de fisión que pueden desprenderse en el caso peor de un accidente del reactor. Este diseño incluye la posible presión que pueda generarse y los requisitos del volumen potencial.

Capítulo 8

MATERIAL DE ENSAYOS, TENSIONES Y EFECTOS DE SERVICIO

Hoy en día se pone mucho énfasis en el diseño, en la operación y en la conveniencia de que el servicio esté disponible. A medida que el equipo se hace viejo, se emplean sistemas de predicción de vida para tratar de predeterminar cuál será la vida futura de una caldera o turbina cuando se reemplacen las piezas en mal estado.

Los operadores, inspectores y personal de mantenimiento están interesados también en el deterioro del material, ya que puede afectar al servicio futuro del equipo. Las causas del fallo del material son muchas: distorsión por adelgazamiento (debilitamiento) o sobrecalentamiento, fracturas dúctiles y frágiles iniciadas por el agrietamiento, roturas por tensiones residuales en soldaduras, roturas por fatiga cíclica, corrosión produciendo adelgazamiento y debilitamiento de paredes o pozos que actúan como puntos de concentración de tensiones, formación de ampollas causadas por sobrecalentamiento del metal, grietas producidas por tensiones derivadas de la corrosión y, en algunos casos, grietas por fragilidad de hidrógeno.

La prueba de materiales desarrolla las propiedades que un material puede tener para aplicación en calderas. Muchas de estas pruebas son exigidas por el Código ASME, los requisitos y especificaciones de la Sección II, y los operadores, inspectores y personal de mantenimiento de calderas entrarán en contacto con ellas en las funciones de su oficio.

CALDERAS Y TENSIONES

Las calderas y muchos recipientes a presión no caldeados conllevan peligros inherentes que pueden causar cuantiosos daños a la propiedad, destrucciones y pérdidas de vidas humanas. Éstas surgen como consecuencia de las presiones a que están sometidas las calderas, las elevadas temperaturas de trabajo a las que funcionan, los ciclos impuestos por el servicio que pueden conducir a fallos o roturas por fatiga, y, finalmente, el desgaste y roturas que ocurren en el material con el paso del tiempo.

Éstas son algunas de las razones por las que las distintas jurisdicciones exigen inspecciones y revisiones periódicas de las calderas.

Adicionalmente, los modernos sistemas de calderas están programados ahora para integrar, en la mayoría de los casos automáticamente, flujos de salida o cargas como caudales de combustible, aire, agua, condensados y productos de combustión en un muy estrecho abanico de rango de valores de ajuste (consignas) deseados para cada uno de ellos con el objetivo de la eficiencia y ahorro energético. Si no se detecta en el tiempo este flujo integrado de ítems, cualquier malfuncionamiento puede producir rotura y también daños posibles al equipamiento, tales como explosiones del lado del hogar, roturas de tubos, sobrecalentamiento de piezas sometidas a presión, formación de ampollas e incluso explosiones aún cuando la presión puede estar dentro de los límites de diseño. Véase la Figura 8.1.

Los fallos y roturas de las calderas son previsibles y, como cada fallo potencial implica algún tipo de tensiones, debería tenerse un buen conocimiento de las tensiones de trabajo en todo lo que se refiere al trabajo de la caldera, pruebas, inspecciones o mantenimiento. Las causas de las tensiones existentes en las calderas deberían ser comprendidas antes de que se haga un intento de calcularlas o analizarlas.

Presión interna y tensiones impuestas. La presión interna es la primera causa a considerar. La medida de presión de vapor en EE. UU. es en unidades psi (libras

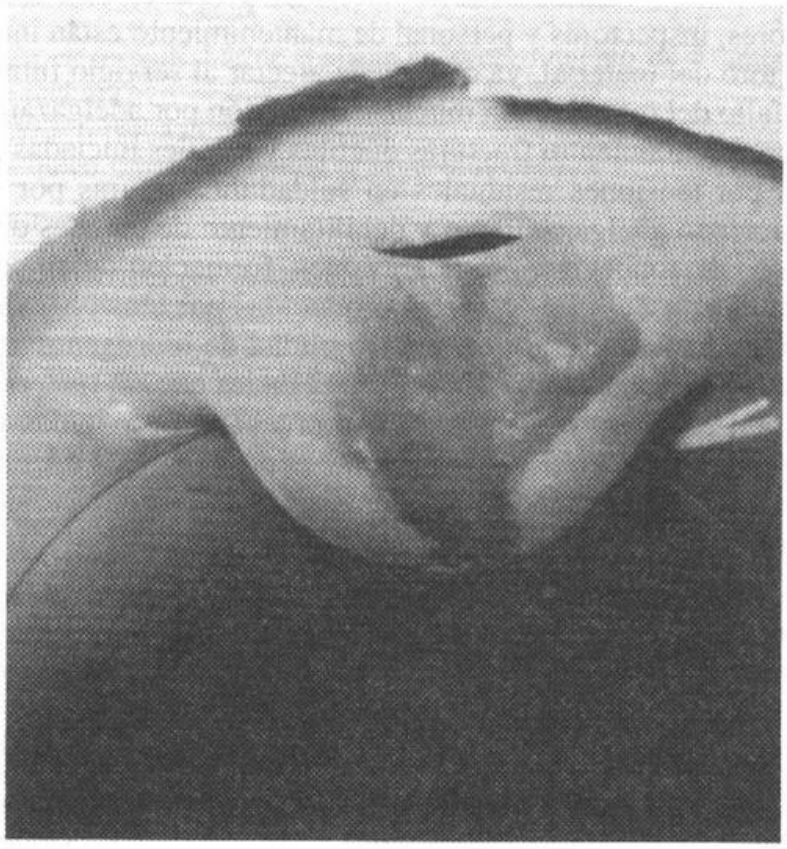


Figura 8.1. La chapa sobrecalentada del hogar de la caldera escocesa marina está combada hacia el interior a causa de la presión de la caldera. (*Cortesía de Royal Insurance Co.*)

por pulgada cuadrada) leída sobre el manómetro (presión manométrica o efectiva) y sobre la presión atmosférica (14,7 psi a nivel del mar, 1,029 atmósferas o 1,029 kg/cm^2). Esta unidad de medida se conoce como presión manométrica o relativa. En algunas fórmulas y tablas de vapor se utiliza la presión absoluta. Esto significa la presión en libras por pulgada cuadrada (o atmósferas o kg/cm^2) por encima del vacío absoluto, que es la presión manométrica más aproximadamente 1,029 kg/cm^2 (14,7 psi a nivel del mar) (es decir, la presión absoluta será la relativa o manométrica más 1,09 atmósferas) a nivel del mar.

Los hechos siguientes se relacionan con la presión unitaria, esto es, la fuerza actuante sobre 1 pulgada cuadrada o centímetro cuadrado si hablamos de presiones en España (kg/cm^2). Si el área de una superficie en una caldera de vapor es de 20 pulgadas cuadradas ($20 \times 20 \times 6{,}4516$ cm^2 = 2.580,64 cm^2) y si está expuesta a una presión de vapor de 50 psi (3,5 kg/cm^2), la fuerza total o carga en esa superficie será de $20 \times 20 \times 50$ = 20.000 lbs o bien 2.580,64 cm^2 × 3,5 kg/cm^2 = 9032,24 kg ($\sim$ 20.000 lbs × 0,4563 = 9072 kg).

Así, es fácil ver que la presión actuante sobre una gran superficie expuesta puede producir una tremenda carga o fuerza con una presión unitaria comparativamente baja. También este ejemplo aclara la falacia de creer que no hay peligro posible en una caldera de baja presión.

Otros factores. Adicionalmente a la presión actuante sobre los componentes estructurales de una caldera, otros factores a considerar son temperatura, funcionamiento cíclico, conocimiento del agrietamiento del material utilizado en servicio de alta temperatura y multitud de factores que implican propiedades de los materiales usados en la fabricación de las calderas. Con el advenimiento de la energía nuclear, se han hecho grandes progresos técnicos en el análisis sistemático de las fuerzas que pueden actuar sobre el material de un recipiente sometido a presión y los métodos o análisis de tensiones que pueden utilizarse para asegurar una vida operativa segura. Esto incluye el uso de fractura mecánica para predecir las fases de crecimiento de la grieta y determinar los ciclos de trabajo antes de que se necesiten reparaciones.

PRUEBA DE MATERIALES: FUERZA Y TENSIÓN

Las propiedades de un material que son importantes al analizar su capacidad para resistir cargas deben revisarse previamente.

Cualquier cuerpo o material sujeto a fuerzas exteriores sobre él resistirá estas fuerzas exteriores. Esta resistencia del material viene del interior del material. La estructura interna del material está sometida a cargas intercristalinas cuando se le aplica una fuerza externa. Así, la tensión se define como la fuerza externa por unidad de superficie en el material que resiste a las fuerzas externas que actúan sobre el material. Se expresa en unidades de fuerza por unidades de superficie (lbs/pulgada cuadrada o kg/cm^2) pero la notación psi no se usa para las tensiones como lo es la notación de presión. Las tensiones siempre se expresan por los ingenieros como lbs/cm^2 para diferenciarla de la designación psi de presiones, que es una fuerza exterior por unidad de área del material (en EE. UU.).

Hay varias clasificaciones generales de tensiones que afectan a los materiales. Una *tensión normal* es una tensión sobre una área de un material producida por una fuerza perpendicular al área sobre la que actúa. Las tensiones normales se clasifican además en esfuerzos de tensión o esfuerzos de compresión. En la Figura 8.2*a*, una barra de 1″ (25,4 mm) de diámetro está tensionada por una fuerza F. Esta fuerza produce una tensión normal sobre el área de la sección normal recta de la barra. Como la fuerza tiende a estirar la barra, se le denomina fuerza tensora (o de extensión). En el interior del material, la estructura intercristalina (suponiendo que se trata de acero) está también sometida a tensiones. La fuerza extensora (de tracción) de la barra se halla por la siguiente ecuación, basada en la definición de tensión en libras por pulgada cuadrada (EE. UU.) o kg/cm^2 (Europa), o fuerza interna por unidad de área interior de la sección normal del material:

$$F = a \cdot S_T$$

donde:

F = fuerza exterior.
a = área de la sección recta del material resistente de la fuerza F.
S_T = tensión (interna) sobre el material.

De esa ecuación se deduce que la tensión S_T es:

$$S_T = \frac{F}{a}$$

Figura 8.2. Determinación de las tensiones de tracción de una barra. (*a*) El espécimen se tensiona hasta que tiene lugar la rotura. (*b*) Área reducida tras la rotura.

Esta ecuación muestra que la tensión de tracción S_T se halla dividiendo la fuerza exterior F, que actúa normal a la sección recta de la barra, por el área de la sección recta del material que resiste el esfuerzo.

Si la fuerza estuviera actuando en dirección opuesta, al material se le impondría una compresión o fuerza compresora (conocida también como fuerza de compresión). Pero la fuerza de compresora se hallaría por la misma ecuación:

$$F = a \cdot S_C$$

donde: S_C = Fuerza o esfuerzo de compresión.

Véase la Figura 8.2*a*. Una barra redonda de 1″ de diámetro soporta una fuerza de 44.000 Lbs (19.958,4 kg) de tracción en una máquina de pruebas cuando la pieza se rompe en dos como se muestra. ¿Cuál es la tensión final de tracción? Utilizando la ecuación de tensión y sustituyendo:

$$F = 44.000 \text{ Lbs } (19.958{,}4 \text{ kg})$$

$$a = \frac{\pi(1)^2}{4} = 0{,}7854 \text{ in}^2$$

$$S_T = \frac{44.000}{0{,}7854} = 56{,}022 \text{ Lbs/in}^2 = 56.022 \text{ Lbs}/2{,}54^2 \text{ cm}^2 =$$

$$= \frac{25.411{,}586 \text{ kg}}{6{,}4516 \text{ cm}^2} = 3.938{,}8 \text{ kg/cm}^2 \text{ tensión final de rotura}$$

ó

$$a = \frac{\pi \cdot 2{,}54 \text{ cm}^2}{4} = 5{,}067 \text{ cm}^2$$

$$S_T = \frac{19.958{,}4 \text{ kg}}{5{,}067 \text{ cm}^2} = 3.938.8 \text{ kg/cm}^2 \text{ tensión final de rotura}$$

La Sección II del código ASME lista la *tensión de tracción* del material para su última carga de rotura. Esta tensión se utiliza al calcular la tensión de un componente de caldera, pero la *tensión admisible* está basada en dividir la tensión de rotura por un *factor de seguridad*, normalmente *4* para cálculos de chapas de virolas, calderines y tubos. La Sección II lista las tensiones admisibles de los materiales para diversas temperaturas superiores a las listadas.

Si una fuerza actúa tangente (lateralmente) a la sección de un material, se produce una tensión de cizalladura. Esto se ilustra en la Figura 8.3 de la página siguiente, en la que una fuerza F, actúa tangente al remache, es decir, tangente a su sección normal (de corte) produciendo así una tensión de cizalladura sobre el roblón o remache. La tensión de cizalladura se halla mediante la ecuación $F = a \cdot S$, donde a es

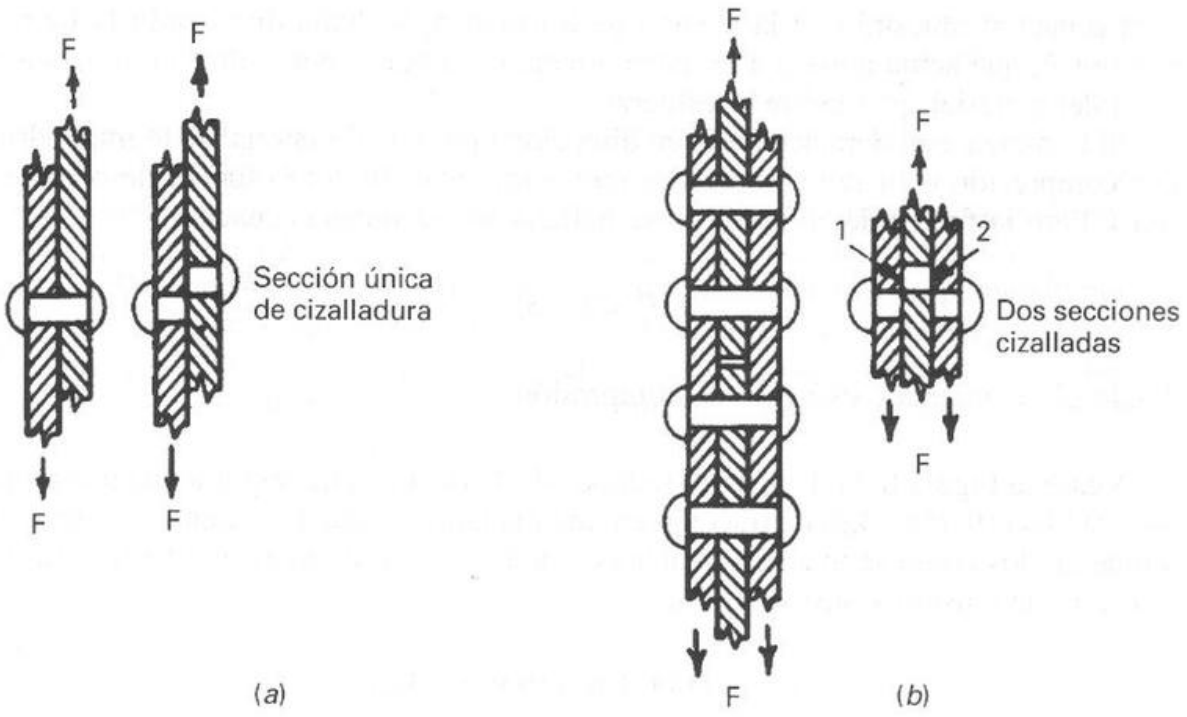


Figura 8.3. (*a*) Remache en cizalladura simple. (*b*) Remache en cizalladura doble.

la sección normal que resiste la tensión de cizalladura. En la Figura 8.3*a*, como sólo una sección del remache está resistiendo la fuerza exterior F, ésta actúa en *cizalladura simple.*

En la Figura 8.3*b*, una junta remachada a tope se muestra con juntas a tope en cada lado de las chapas extremas. Los roblones o remaches en esta ilustración están trabajando a cizalladura doble, con dos secciones del remache resistiendo la carga F. Un ejemplo ilustrará la justificación de cizalladura simple y doble.

Suponiendo que en las Figuras 8.3*a* y 8.3*b* sólo se considera para análisis un remache o roblón, pero no está trabajando a cizalladura simple, el otro está trabajando a doble cizalladura. Suponiendo que el remache o roblón es de 1″ de diámetro en cada caso y la carga F es de 15.000 Lbs (6.804 kg) sobre cada remache. ¿Cuál es el esfuerzo de cizalladura en cada remache?

Remache en cizalladura *simple*:

$$S_S = \frac{F}{a}$$

$$a = 0{,}7854 \text{ in}^2$$

$$S_S = \frac{15.000 \text{ Lbs}}{0{,}7854 \text{ in}^2} = 19.099 \text{ Lbs/in}^2 = 1.343 \text{ kg/cm}^2$$

Remache en cizalladura *doble*:

$$S_S = \frac{F}{a}$$

$$a = 2 \times 0{,}7854 \text{ in}^2 = 1{,}5708 \text{ in}^2 = 12{,}9032 \text{ cm}^2$$

$$S_S = \frac{15.000 \text{ Lbs}}{1{,}5708 \text{ in}^2} = 9.549{,}5 \text{ Lbs/in}^2 = 671 \text{ kg/cm}^2$$

Esto demuestra que cada roblón o remache sometido a cizalladura doble es dos veces más fuerte o doblemente resistente que un roblón sometido a cizalladura simple.

Otra tensión es la debida a la flexión. Una viga soportada por sus dos extremos y cargada en el centro desarrollará una *tensión o esfuerzo flector*. La viga, cuando flexiona, actuará sometida a un esfuerzo de tracción por una cara y a un esfuerzo de compresión por la cara opuesta. Esto se ilustra en la Figura 8.4. Las chapas planas y superficies arriostradas en las calderas son algunos de los elementos sometidos a esfuerzos de flexión.

Nota. Los esfuerzos debidos a la torsión, como en un eje rotativo y transmisor de potencia, son otro tipo de tensión considerada en un análisis de resistencia de materiales. El análisis de tensiones está más allá de la visión de este libro. Sin embargo, es esencial un conocimiento de la tensión, compresión, cizalladura y flexión para comprender cómo la presión actúa en un recipiente o vasija a presión, tubería o cualquier otro aparato hecho de un material y diseñado para contener y resistir la presión dentro de unos límites seguros.

Tensión. Cuando un cuerpo o material se somete a fuerzas exteriores, las tensiones internas resisten estas fuerzas, pero siempre hay alguna deformación o extensión por la carga. Por ejemplo, una vasija de acero se alargará o extenderá cuando se la someta a una fuerza extensora exterior. El *alargamiento total* o extensión total se expresa en una medida de longitud tal como pulgadas o centímetros. El *alargamiento unitario* o por unidad se define como la longitud extendida que se produce en un cuerpo por unidad de longitud, y se expresa siempre en pulgadas por pulgada, en centímetros por centímetro, etc. Por ejemplo, supongamos que una varilla de acero de 10″ (25,4 cm) de longitud se estira por la carga de

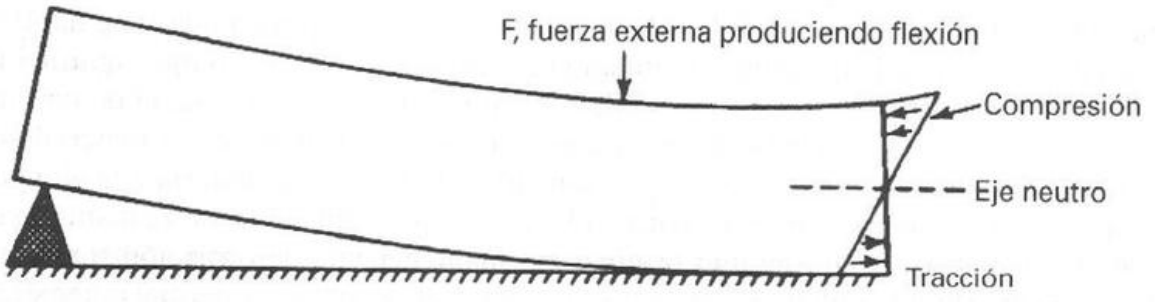


Figura 8.4. La flexión produce esfuerzos de comprensión en la parte superior de la viga y esfuerzos de tracción en la parte inferior de la viga.

tracción 0,01″ (0,254 mm); entonces el alargamiento unitario será de 0,01″/10″ = 0,254 mm/254 mm = 1/1.000.

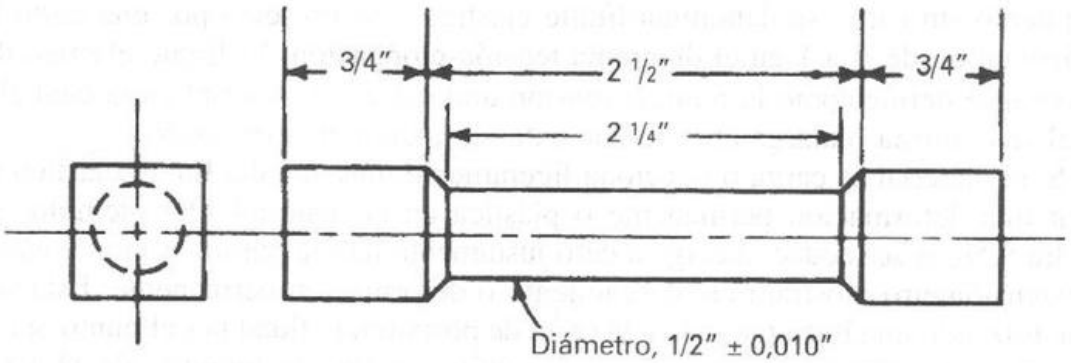
Algunas de las propiedades fundamentales de todos los materiales estructurales que pueden determinarse, se hallan por medio de diagramas de *tensión-alargamiento*. A partir del diagrama de tensión-alargamiento, se determinan las propiedades estructurales tales como *límite de proporcionalidad*, *límite elástico*, *tensión máxima*, y *módulo de elasticidad*.

La práctica moderna de ingeniería requiere las pruebas de materiales de modo que se especifiquen y se puedan determinar sus propiedades físicas. Esto es particularmente cierto para los materiales que se trata de utilizar en la construcción de calderas, recipientes a presión y reactores nucleares. Los laboratorios de los fabricantes de acero realizan pruebas y el Código de calderas nos muestra los esquemas y requerimientos para preparar muestras que sirvan para realizar pruebas de esfuerzos, de tensión y de flexión sobre los materiales de construcción de calderas.

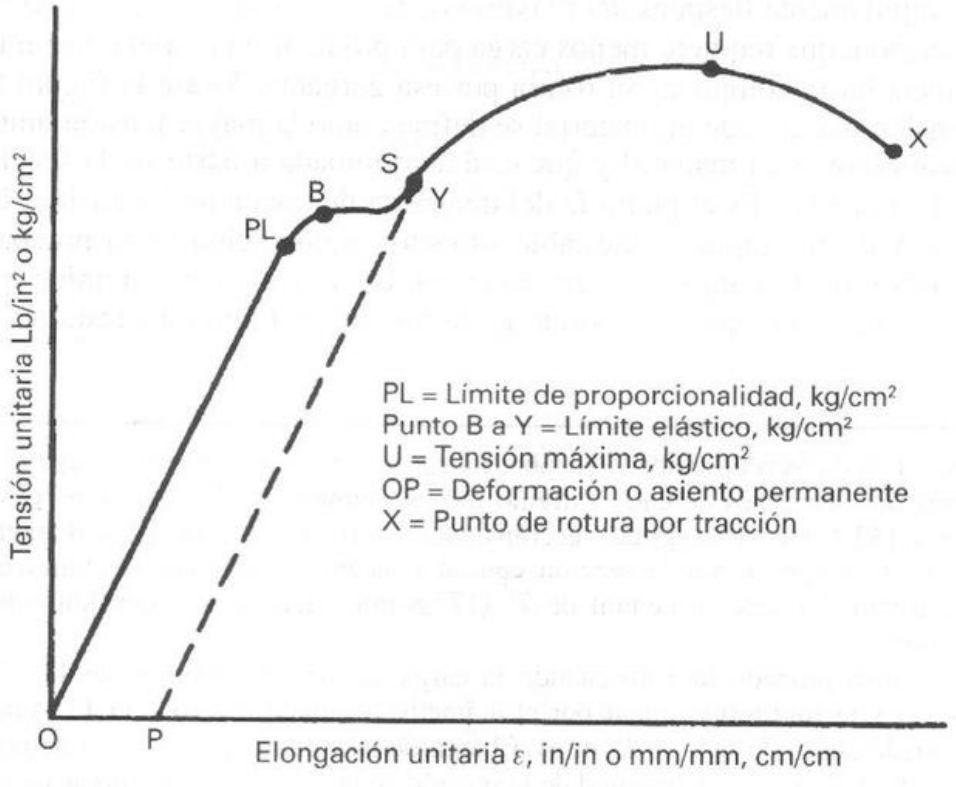
Pruebas de tracción. Una muestra o espécimen de un tipo de acero especificado se corta de una bobina laminada de chapa con el fin de realizar una prueba. Un espécimen para una prueba o extensión se muestra en la Figura 8.5*a*. Los extremos cuadrados se sitúan o fijan sobre las mandíbulas o mecanismos de sujeción de una máquina de pruebas de tracción. La parte central de la pieza cilíndrica de 1/2″ (12,7 mm) de diámetro y longitud aproximada de 2″ (50,8 mm) se le acopla un extensiómetro de 2″ (50,8 mm) de longitud calibrada. La máquina de tracción tiene un dial o reloj indicador de la fuerza F o esfuerzo tractor aplicado a la pieza de prueba. Se le va aplicando una fuerza gradualmente creciente. A cada incremento de esfuerzo, se registra F, así como la longitud total l incrementada (para cada aumento de carga). Este procedimiento se sigue hasta que ocurra la rotura de la pieza espécimen. Se tabulan los datos registrados y así, de la relación F/A, donde A es la sección original de 1/2″ (12,7 mm) de diámetro, se obtienen las tensiones para cada incremento de carga.

El alargamiento unitario o elongación se obtiene por cálculo a partir de la longitud original de 2″ (50,8 mm) hasta obtener la elongación unitaria ε. Estos valores se sitúan como en la Figura 8.5*b*, mostrando el diagrama tensión-alargamiento para el acero dúctil.

El diagrama tracción-elongación presenta una línea recta que va desde cero hasta el punto señalado con *PL*. La razón es que a medida que la carga aumenta, se incrementa la tensión (tracción) S impuesta, como también lo hace la elongación ε. El incremento para ambas está en la misma relación, lo que significa que si se duplica la carga, se duplica la tracción y lo mismo la elongación. Esto es lo que significa la línea recta (no curva) de proporcionalidad. El límite de proporcionalidad de un material es pues la máxima tensión unitaria que puede desarrollarse en el material sin producir desviación de la ley de proporcionalidad de la tensión unitaria a la elongación unitaria. De incluso mayor significado, ello implica que si la carga disminuye, el material volverá a su longitud original sin mantener una deformación o asiento permanente como resultado de la carga. El material no quedará permanentemente deformado, sino que volverá a su forma original en tanto en cuanto no se exceda el límite de proporcionalidad.



(*a*)



(*b*)

Figura 8.5. (*a*) Espécimen o probeta preparada para ensayo de tracción. (*b*) Diagrama tensión-alargamiento obtenido de una prueba tensora para un material dúctil.

A medida que se aumenta más la carga sobre el espécimen, produciendo una tensión o tracción mayor que el límite proporcional, se llega a una tensión unitaria en cuyo punto el material continuará alargándose sin aumento de carga, suponiendo que se trata de un material dúctil. La tensión unitaria a la que tiene lugar este es-

tiramiento sin carga se denomina límite elástico y se presenta por una corta línea horizontal desde *B* a *Y* en el diagrama tensión-elongación. El límite elástico de un material se define como la mínima tensión unitaria en el material en la cual el material se deforma o alarga apreciablemente sin incremento de carga.

Si el material se carga o tracciona ligeramente más allá del límite elástico tiene lugar una deformación permanente o plástica en el material. Por ejemplo, en la Figura 8.5*b*, si se reduce la carga a cero justamente habría pasado el límite elástico, el extensiómetro mostrará un alargamiento o deformación permanente. Ésta se obtiene trazando una línea paralela a la recta de proporcionalidad por el punto *S(Y)* y la deformación permanente sobre nuestro espécimen será la longitud de *O* a *P* por unidad de longitud del espécimen (alargamiento permanente unitario).

Si se aumenta la carga sobre nuestro espécimen, como se indica por la curva *S* a *U*, se alcanza un punto de máxima tensión unitaria (el máximo de la curva). En dicho punto, la tensión unitaria empieza a disminuir con una ligera carga adicional y se alarga hasta que se rompe. Esto es particularmente cierto para el material dúctil, que adelgaza rápidamente después del máximo de tensión unitaria a causa de la reducción de sección, que requiere menos carga para producir una rápida disminución de sección recta hasta completar su rotura por esa garganta. Véase la Figura 8.2*b*.

La tensión máxima de un material se define como la mayor tensión unitaria que puede alcanzarse en el material y que está determinada a partir de la sección recta original del material. Es el punto *U* del diagrama de tracción-elongación. La curva desde *U* a *X* es una rápida e inestable situación o condición de la prueba, con el punto *X* denominado punto de rotura en carga. La máxima tensión unitaria es en el punto *U*, y ésta es la tensión máxima de diseño del material en cuestión.

Ejemplo. Los datos proporcionados sobre un espécimen de prueba son: longitud total 19″ (482,6 mm); las secciones de cada extremo del espécimen son 1″ × 1″ × 6″ (25,4 mm × × 25,4 mm × 152,4 mm) de longitud; sección central, 7/16″ (11,1125 mm) de diámetro por 7″ (177,8 mm) de longitud con la sección central concéntrica con las secciones cuadradas de cada extremo. La sección central de 7″ (177,8 mm) tiene una marcación calibrada de 2″ (50,8 mm).

El espécimen probado ha roto cuando la carga alcanzó un máximo de 11.274,75 Lbs (5.118,74 kg) y la rotura tuvo lugar por el diámetro original de 7/16″ (11,11 mm). Pero el diámetro quedó ahora de 1/4″ (6,35 mm). El área de la sección de una barra de 6/16″ es de 0,15033 in^2 (96,987 mm^2). La longitud de la sección central de 2″ (50,8 mm) se ha alargado a 2,55″ (64,77 mm).

1. Hallar la tensión máxima del material.
2. ¿Cuál es la tensión máxima en libras por pulgada cuadrada (kg/cm^2) de la sección de 1″ × 1″ de cada extremo?
3. ¿Cuál es el porcentaje de elongación en la sección de la zona de 2″?

Solución.

1. En este problema la rotura fue en la sección de 7/16″ de diámetro así que la tensión *S* es de:

$$S = \frac{F}{a}$$

donde: a = sección recta original.

Es decir:

$$S = \frac{11.274{,}75 \text{ Lbs}}{0{,}15033 \text{ in}^2} = 75.000 \text{ Lbs/in}^2$$

$$S = \frac{5.118{,}74 \text{ kg}}{0{,}96987 \text{ cm}^2} = 5.277{,}76 \text{ kg/cm}^2$$

2. La tensión máxima en la sección de 1″ × 1″ es la misma (7.500 lb/ in^2 = 5.278 kg/cm^2) porque es el mismo material. No rompe por esta sección porque el área es mayor que en la sección de 7/16″ de diámetro.
3. El porcentaje de elongación se halla como sigue:

$$\frac{(\text{Longitud final} - \text{longitud original}) \times 100}{\text{Longitud original}} = \% \text{ de elongación}$$

$$\frac{(2{,}55 - 2) \times 100\,\%}{2} = \frac{0{,}55\,\%}{2} = 27{,}5\ \%$$

El *módulo de elasticidad* también conocido como *módulo de Hooke* (Ley de Hooke) establece que la tensión unitaria de un material es proporcional a la elongación unitaria acompañante, supuesto que la tensión unitaria no excede del límite de proporcionalidad. En otras palabras, establece que la relación de tensiones a elongación para un determinado material es siempre constante, y se denomina E, o módulo de elasticidad, o dicho en forma de ecuación:

$$E = \frac{\text{Tensión}}{\text{Elongación}} = \frac{S}{\varepsilon} = \text{constante}$$

Para el acero, el módulo de elasticidad se toma usualmente como 30.000.000 y se escribe 30×10^6 Lbs/in^2 (2.109.210 kg/cm^2 o $2{,}1 \times 10^6$ kg/cm^2). Éste es el módulo de elasticidad para cargas normales o axiales. Hay también un módulo elástico de cizalladura. Para el acero es de 12×10^6 Lbs/in^2 (843.684 kg/cm^2).

Los dinamómetros, diales de tensión o relojes tensores se utilizan para determinar las tensiones o tracciones en secciones críticas de calderas, reactores nucleares y recipientes a presión para los cuales no puede hacerse un cálculo exacto de tensiones. Con las siguientes relaciones entre tensión, elongación y módulo de elasticidad del material pueden calcularse los esfuerzos. Es mucho más fácil de medir la elongación (alargamiento) o la deformación de un material bajo carga, que medir tensiones o esfuerzos.

Hemos dicho que las tensiones para cargas normales son F/a, donde F = carga impuesta y a = área original o sección resistente a la carga del material en cuestión. También decimos que la elongación unitaria ε es e/l, donde ε = elongación en cms/cm, e = aumento de longitud a partir de la longitud original y l = longitud original.

Así que E = Tensión/Elongación y sustituyendo los valores de arriba obtenemos:

$$E = \frac{F/a}{e/l} = \frac{S}{e/l}$$

siendo:

$$S = \frac{F}{a}$$

Reescribiendo esto en términos de la tensión S:

$$S = \frac{E \times e}{l} = E \times \varepsilon$$

ya que:

$$\frac{e}{l} = \varepsilon$$

Ejemplo. Una sección anormal de una caldera fue diseñada de modo que no se podía calcular exactamente la tensión impuesta a ella. El acero tenía un modulo de elasticidad de 30×10^6 Lbs/in^2 (2.109.210 kg/cm^2). Se marcó una longitud de 8″ (203,2 mm). Desde la ausencia de carga hasta la plena carga, esta longitud aumentó a 8,009″. ¿Cuál fue la tensión en esta sección de la pieza?

Solución. Utilicemos $S = E \cdot \varepsilon$ con

$$\varepsilon = e/l = 0{,}009/8 \quad \text{y} \quad E = 2.109.210 \text{ kg/cm}^2$$

$$S = (0{,}009/8) \times 2.109.210 \text{ kg/cm}^2 = 2.372{,}9 \text{ kg/cm}^2$$

Puede verse que si se mide la elongación, puede calcularse la tensión conociendo el módulo de elasticidad del material, que normalmente es una constante para la clase de material que se considere.

El módulo de elasticidad es una medida de rigidez del material. Por ejemplo, si un material tiene un módulo de elasticidad doble que el de otro material, la elongación unitaria en el primer material, para una tensión unitaria dada, será la mitad que en el otro material. Así pues, un material se considera doble de rígido que el otro. Algunos valores normales de E son: acero = 30×10^6 lbs/in^2 ($2{,}1 \times 10^6$ kg/cm^2); fundición = 15×10^6 lbs/in^2 ($1{,}05 \times 10^6$ kg/cm^2); aluminio = 12×10^6 lbs/in^2 (843.684 kg/cm^2); hormigón = 3×10^6 lbs/in^2 (210.921 kg/cm^2).

El límite elástico es el máximo esfuerzo unitario que puede desarrollarse en el material sin causar una deformación permanente. Los resultados de las pruebas

muestran que para la mayoría de los metales estructurales, el límite elástico del material tiene casi el mismo valor que el límite proporcional, y en la mayor parte de la literatura técnica los límites elástico y proporcional se consideran idénticos. Una pequeña diferencia aparece en las pruebas, pero para los efectos y propósitos técnicos pueden tratarse como cantidades idénticas.

Tensiones sobre virolas cilíndricas y tubos. La presión interna en una virola cilíndrica cerrada en cada extremo tiende a reventar o colapsar la vasija a lo largo de dos ejes distintos. Primero, la presión total actuando sobre la virola tiende a producir la ruptura a lo largo del eje longitudinal. La presión total actuando sobre los fondos tiende a causar la fractura de la virola alrededor de su circunferencia.

Los cilindros de paredes delgadas, significando esto que el espesor de la virola no excede de la mitad del radio interior, tienen dos tensiones, *tensión longitudinal* y *tensión circunferencial*. A esta última a veces se la denomina *tensión transversal*. Los cilindros de paredes de gran espesor tienen también estas tensiones pero se determinan de un modo diferente. Ambas tensiones se conocen por estos nombres a causa de la carga que resisten en un cilindro. Ambos son fundamentalmente esfuerzos de tracción o tensiones de tracción.

La Figura 8.6*a* de la página siguiente muestra un cilindro sin costura con un diámetro interior D, espesor de virola t, longitud L y con una presión uniforme P actuando dentro del cilindro. La presión actúa sobre las paredes del cilindro, de modo que la fuerza resultante creada tiende a separar el cilindro a lo largo de su eje. Así pues, el primer esfuerzo a considerar es la tensión longitudinal que resiste la fuerza tendente a separar el cilindro a lo largo de este eje. La presión actúa en todas direcciones. Pero si nosotros cortamos el cilindro como en la Figura 8.6*b*, que muestra la fuerza externa sobre un lado y también la tensión interna del material resistiendo a esta fuerza externa, lo siguiente tiene lugar para que exista la condición de equilibrio.

La fuerza tendente a separar el cilindro es la sección por la presión. Esto es:

$$D \times L \times P = \text{fuerza actuando sobre un lado}$$

donde $D \times L$ = área efectiva proyectada. La fuerza interna del material que resiste a este esfuerzo es:

$$\text{Tensión} \times \text{área del material}$$

o

$$S_L \times t \times L \times 2 = \text{fuerza resistente}$$

donde $t \times L$ = una sección del material. Pero como son dos áreas materiales resistiendo la fuerza, esto está multiplicado por dos. Igualando las dos fuerzas dadas:

$$D \times L \times P = S_L \times t \times L \times 2$$

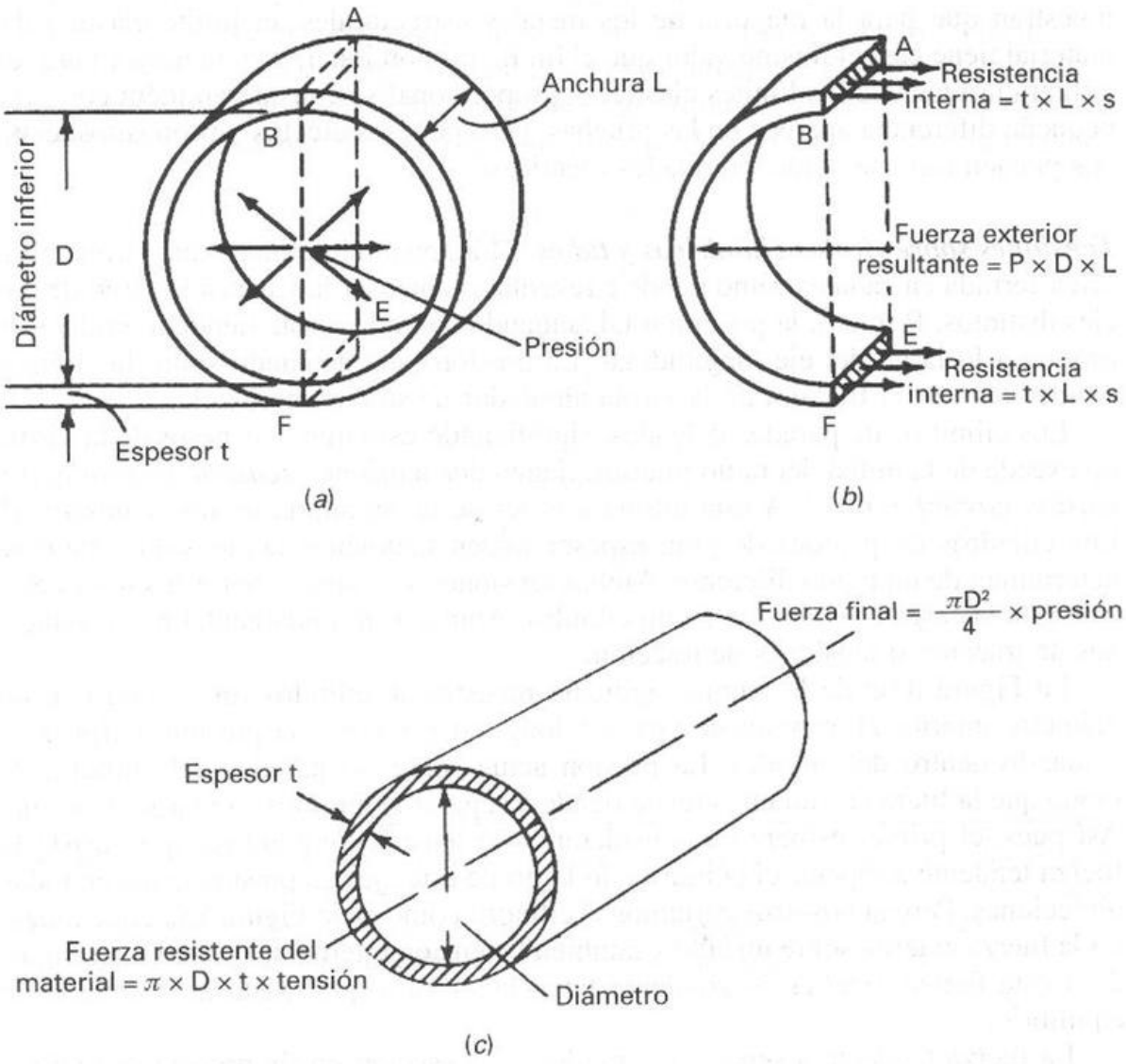


Figura 8.6. (*a*) y (*b*) La fuerza longitudinal con la presión actuando sobre el lateral del cilindro tiende a separar el cilindro a lo ancho. (*c*) La presión sobre el fondo del cilindro tiende a separar el cilindro circunferencialmente.

De aquí se deduce que:

$$\text{Tensión longitudinal, } S_L = \frac{\text{P} \times \text{D}}{2t}$$

La fuerza tendente a separar la tapa final del cilindro, o alrededor de su circunferencia, se muestra en la Figura 8.6*c*. La presión actuando sobre cada tapa final crea una fuerza que es igual al área circular multiplicado por la presión o:

$$\frac{\pi D^2}{4} \times \text{presión} = \text{Fuerza final}$$

El material resiste con una fuerza igual al área final del material multiplicada por la tensión, es decir:

$$\pi DtS_C = \text{Fuerza resistente}$$

donde S_C es la tensión circunferencial. Igualando las dos fuerzas para su equilibrio da:

$$\frac{\pi D^2}{4} \times P = \pi DtS_C$$

Resolviendo por eliminación, resulta para la tensión circunferencial:

$$S_C = \frac{PD}{4t}$$

Si comparamos esto con la tensión longitudinal, encontramos que la tensión circunferencial es la mitad de la longitudinal.

Las dos ecuaciones de las tensiones longitudinal y circunferencial son las ecuaciones fundamentales de la resistencia del material. Ambas se modifican algo por el Código de calderas y recipientes a presión para tener en cuenta factores y experiencias de fabricación.

Las ecuaciones desarrolladas son para construcciones sin costura (sin soldadura), significando ello que no hay junta soldada, ni roblonada, ni junta de ningún otro tipo de ligamento. Los capítulos mostrarán cómo la eficacia de la junta tiene que considerarse para modificar estas ecuaciones. Nótese que las ecuaciones para ambas tensiones longitudinal y circunferencial (debidas a la presión) son independientes de la longitud del recipiente. Pero si un recipiente es muy largo, la tensión debida a la flexión tendrá que añadirse a la tensión debida a la presión. Esto es especialmente cierto para un recipiente lleno con una sustancia de peso considerable.

La significación de la tensión circunferencial por ser la mitad de la tensión longitudinal en un cilindro conlleva muchos problemas en el diseño y cálculo de una caldera. Por ejemplo, las viejas calderas y en las juntas circunferenciales roblonadas no tienen que ser tan fuertes en esta dirección como han de serlo en la junta longitudinal. Pero para muchos cálculos es extremadamente importante comprobar un cilindro en ambas direcciones longitudinalmente y circunferencialmente, de modo que se esté seguro de que la tensión circunferencial es la mitad al menos de la tensión longitudinal. Esto se verá en otro capítulo.

Efectos de la temperatura. La temperatura por encima de los límites diseñados tiene el efecto inmediato de rebajar la tensión admisible en un material. Por ejemplo, una chapa de acero al carbono calidad caja de fuegos (hogar) grado A, SA–30 tiene una tensión admisible de 12.000 Lbs/in^2 (843,7 kg/cm^2) para temperaturas entre –20 a 400 °F (–6,7 °C a 204 °C). A 900 °F (482 °C) la tensión admisible es de sólo 5.000 Lbs/in^2 (352 kg/cm^2). Suponiendo la misma presión a ambas temperaturas, puede verse que en una caldera diseñada para 12.000 Lbs/in^2 (843,7 kg/cm^2), la

tensión normal será rebajada a 5.000/12.000, o 41,7 por 100 de su tensión original para un incremento térmico hasta 900 °F (482 °C).

Ciertas partes de una caldera, particularmente los tubos, chapas o placas de los tubos, hogares de calderas escocesas marinas y piezas de fundición en calderas de hierro fundido son muy susceptibles a la temperatura o daño por sobrecalentamiento. Un gran aumento de temperatura en un material acompañado de una bajada de los niveles de tensión admisible es una de las causas más comunes de daños y roturas en calderas. El nivel de agua bajo, la circulación pobre y los materiales depositados son algunas de las causas de recalentamiento del material más allá de sus niveles de tensión de seguridad. No nos olvidemos de que el lado del fuego de las calderas está suficientemente caliente como para fundir el acero. Y con la presión existente sobre el lado del agua o vapor, no se requiere mucho sobrecalentamiento para producir roturas, ampollas y otras deformaciones. De este modo, si se tensiona el material por encima de su tensión elástica a elevada temperatura, se alcanza el nivel de la tensión de rotura del material a elevada temperatura, conduciendo a una rotura de las partes afectadas de la caldera.

Las tensiones y esfuerzos sobre las piezas de la caldera pueden también producirse por dilatación térmica a causa de los aumentos o subidas de temperatura y son pronunciadas si las piezas están constreñidas a causa de las restricciones o por uniones metálicas con diferencia de espesor que se unen abruptamente sin secciones de transición. La temperatura produce la dilatación del acero, que puede calcularse como sigue:

$$e = n \cdot l \cdot (T_2 - T_1)$$

donde: e = cambio de longitud
l = longitud original
T_1 = temperatura original, °F (o °C)
T_2 = temperatura final, °F (o °C)
n = coeficiente de dilatación (cambio o incremento de longitud por unidad de longitud y por grado (centígrado) de temperatura.

Ejemplo. El acero tiene un coeficiente de dilatación térmica de 0,0000065″ por pulgada por °F. Para mostrar la posible tasa de dilatación a considerar, suponer que una riostra en una caldera de retorno horizontal tubular (HRT) de humos tiene una longitud de placa tubular a placa tubular de 30 ft (9 mts). ¿Cuanto dilatará este tirante (redondo) con un cambio de temperatura de 70 °F a 300 °F (21 °C a 149 °C), suponiendo que dilata libremente?

Sustituyendo en la ecuación:

$$e = n \cdot l \cdot (T_2 - T_1)$$

obtenemos:

$$e = 0{,}0000065 \cdot (30 \cdot 12) \cdot (300 - 70) =$$

$$= 0{,}5382'' \text{ (13,67 mm), que es más de 1/2″ (13 mm)}$$

Si suponemos que el redondo está fijado a cada placa extrema y que las flechas o placas de fijación de los tubos no cedan sino que aguanten en sus dimensiones y posición. ¿Qué tensión de compresión S_c se impondrá al tirante o riostra depreciando el efecto-columna de una riostra larga?

Esto se calcula a partir de la ecuación del módulo de elasticidad

$$S = E \cdot \varepsilon$$

donde ε = elongación/unidad de longitud. Así:

$$S = (30.000.000 \text{ Lbs/in}^2) \cdot \frac{0{,}5382}{30 \cdot 12} =$$
$$= 44.850 \text{ Lbs/in}^2 = 3.153 \text{ kg/cm}^2$$

Este ejemplo ilustra la importancia de considerar los efectos de la temperatura en el diseño de una caldera y el rápido crecimiento de las tensiones cuando una pieza o parte de la caldera se recalienta accidentalmente por encima de las condiciones de diseño. Recuerde que la tensión desarrollada no se calcula tan sencillamente como se ha demostrado por la ilustración dada. Por ejemplo, hemos supuesto que la virola y las placas *no* dilatan por efecto de la temperatura.

Se usan *calibres* para medir la elongación o dilatación de una cierta longitud de un material. Usando la ecuación del módulo de elasticidad para el material, puede calcularse la tensión sobre un componente utilizando:

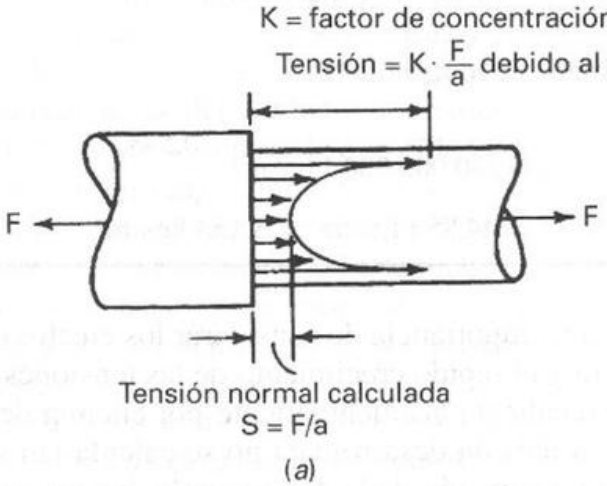
$$S = E \cdot \varepsilon$$

Si un tubo pierde por la junta de laminación pero no pandea ni se abomba es señal de que la fuerza expansora es mayor que la tensión o fuerza de unión de la junta laminada. Las juntas laminadas son equivalentes a los *encajes forzados* (a prensa) dependientes de la fricción de las áreas o zonas de contacto para mantener los tubos estancos en o con una chapa tubular. La excepción, por supuesto, son los tubos soldados, donde se genera una tensión de cizalladura por la dilatación.

Efectos de la concentración de tensiones. Si un material o pieza estructural tiene un cambio de sección brusco, por ejemplo, una chapa plana que contenga una abertura o una esquina puntiaguda como se muestra en la Figura 8.7*a*, la distribución de tensiones no es uniforme a lo largo de toda la sección recta del material. Cerca del cambio repentino, la tensión es mucho mayor que la calculada. De la sección afectada se dice que tiene una «concentración de tensiones» en la zona o área, y la relación por la que tiene que multiplicarse la tensión normal, K en la Figura 8.7*a*, se llama *factor de concentración de tensiones.*

La concentración de tensiones juega un papel importante en las piezas de estructuras sujetas a un repetido tipo de cargas, para el que la concentración de tensiones puede llevar a grietas y fallos de rotura por fatiga. Si la concentración de tensiones es bastante severa (incluso con carga normal o nominal), pueden inducirse tensiones por encima del nivel esperado de tensiones. Los ángulos afilados en las

uniones soldadas y otras formas puntiagudas deben evitarse. De este modo, los cortes de las aberturas en las chapas deben reforzarse para fortalecer los bordes alrededor de la abertura contra la concentración de tensiones.



(*a*)

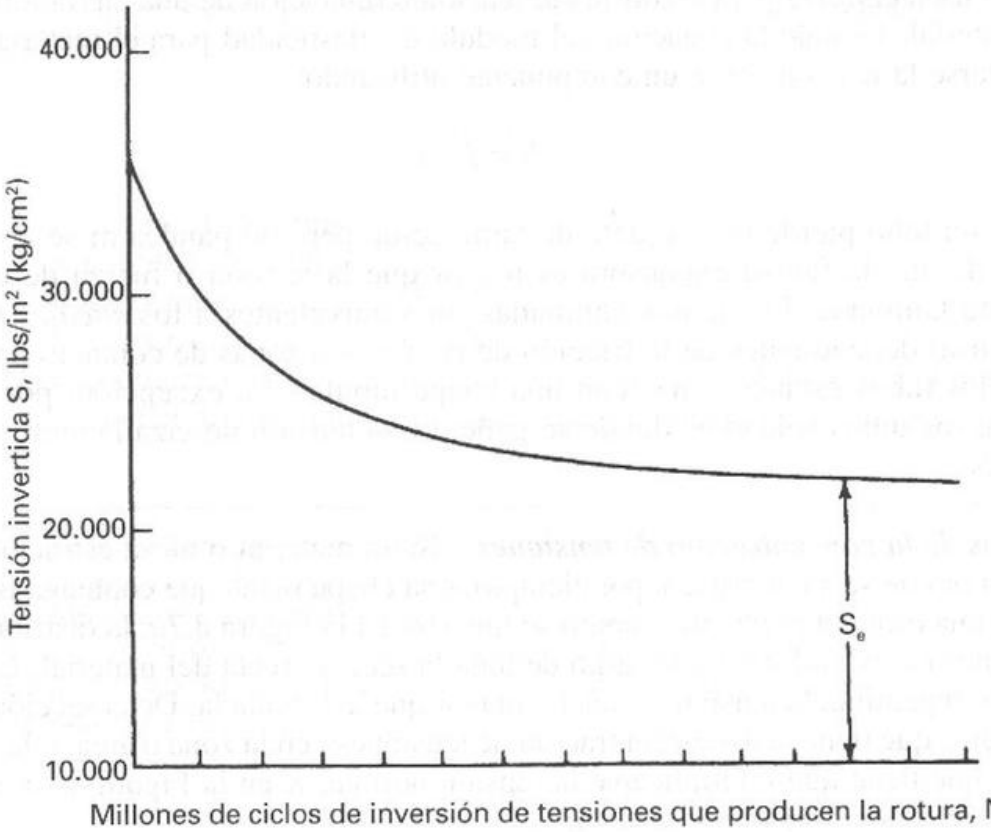


Figura 8.7. (*a*) Los ángulos rectos producen concentración de tensiones que aumentan las tensiones normales de cálculo. Éstas deben multiplicarse por un factor de concentración de tensiones para hallar la verdadera tensión en el cambio de sección brusco. (*b*) Los diagramas S-N son usados para determinar el límite de duración de los diversos materiales.

El Código de calderas especifica las conexiones permisibles de una junta para evitar la concentración de tensiones. Los radios de los refuerzos se especifican de modo formal. Las aberturas se calculan según las reglas del Código. En el trabajo analítico y de diseño, las concentraciones de tensiones se determinan por *métodos fotoelásticos*, por el *método de la capa* o *pintura de tensiones* y por el *método del medidor de elongaciones* utilizando el control de medida de resistencia eléctrica.

Límite de resistencia. En vasijas o recipientes nucleares uno debe diseñar cuidadosamente los elementos por el límite de agotamiento y otros métodos de análisis de tensiones. El límite de agotamiento (también conocido como *límite de fatiga*) es la máxima tensión unitaria que puede componerse y repetirse sobre un material a través de un ciclo definido, o rango de tensiones, por un número indefinidamente grande de veces sin producir la rotura del material.

¿Cómo se determina el límite de resistencia? Probando el material a través de una inversión completa de tensiones. Cuando el material haya sido tensionado cerca de su límite de ruptura (o de resistencia), el espécimen romperá después de unos pocos ciclos. Si una segunda muestra del mismo material se prueba de nuevo y se tensiona ligeramente menos que antes, puede imponerse un mayor número de inversiones o ciclos. Esto continúa hasta un valor límite, conocido como *límite de duración* o *resistencia*, que se alcanza cuando se impone un número casi indefinido de ciclos de tensión, sin producir rotura.

La Figura 8.7*b* muestra un diagrama *S-N*, donde se dibujan en un eje las tensiones hasta la rotura y el número de ciclos hasta el fallo en el otro. La línea horizontal asintótica obtenida es la tensión de resistencia (de duración) para el material. En la Figura 8.7*b* este valor es de 22.500 Lbs/in^2 (1.582 kg/cm^2). Los límites de duración o resistencia se usan con profusión en el trabajo de diseño de las maquinas, y con la adopción del Código de Recipientes Nucleares, Sección III, recibirá mayor atención en el Código. Los límites de resistencia duradera de los materiales pueden modificarse considerablemente por las condiciones ambientales, oscilaciones de temperatura, efectos corrosivos, fragilidad de hidrógeno y otras condiciones similares que generalmente implican estudio de fatigas de metales. Por ejemplo, las discontinuidades o factores de concentración de tensiones como los ángulos agudos o grietas pueden minorar o modificar los límites de resistencia o durabilidad, como pueden hacerlo los ambientes corrosivos sobre una pieza tensionada.

Crecimiento de la grieta: fractura mecánica. La tasa de crecimiento de la grieta por fatiga ha sido cuantificada como resultado de un intenso trabajo de desarrollo en el campo del análisis de tensiones espacial y nuclear. Si se asume que existe una grieta en un material y si este material, supuesto que es acero, está sometido a tensión se desarrollará una deformación plástica sobre el extremo de la grieta. La grieta puede crecer por deformación plástica a medida que la carga o tensión aplicada crece. La distancia a que el frente de la grieta avanza con cada ciclo de carga es una función de la intensidad de la tensión aplicada al borde de la grieta, que se expresa como factor de intensidad de la tensión ΔK. La tasa de crecimiento de la grieta en pulgadas (o mm) por ciclo de aplicación de tensión, se expresa como:

$$\frac{d(a)}{d(N)}$$

donde: a = tensión de la grieta en pulgadas (o mm) y N = vida de fatiga o número de ciclos de tensión antes del fallo. Una ecuación para la tasa de crecimiento de la grieta usada en análisis de rotura o fallo es:

$$\frac{d(a)}{d(N)} = C(\Delta K)^m$$

donde: C = constante del material determinada por pruebas para el tipo de material (para acero a temperatura ambiente, se usa 4×10^{-24}).
m = constante del material deducida de pruebas (para material ferroso, se utiliza 4).

Véase la Figura 8.8*a*. Los datos de propagación de la grieta pueden utilizarse para determinar la intensidad de la tensión ΔK que puede tolerarse para un diseño particular. También el número de ciclos requerido para extender una grieta inicial de tamaño a_1, a lo que se considera tamaño crítico de grieta, a_2, puede establecerse usando la ecuación de propagación de la grieta por fatiga, $d(a)/d(N)$.

Los mecanismos de rotura y los métodos NDT se están utilizando para determinar si un defecto necesita reparación inmediata o si todavía se pueden aplicar muchos más ciclos de tensión hasta que el defecto haya crecido hasta un tamaño que precise reparación o reemplazo de la pieza. En las últimas décadas ha habido una gran cantidad de actividad de investigación dirigida a este método de predicción de fallos aplicado como mecanismo básico de fenómenos de rotura en sólidos. La determinación de la tasa de crecimiento de grieta ayuda al establecimiento del número de ciclos que pueden tolerarse antes de que se necesiten medidas correctivas. Los métodos de pruebas NTD se utilizan para comprobación periódica del desarrollo del defecto en conjunción con los métodos de fractura mecánica.

La prevención de los fallos por fatiga asegura la contención del crecimiento de la grieta dentro de lo que se considera límites seguros. Cuando son posibles las inspecciones en servicio, se establece un intervalo de servicio seguro entre inspecciones. Cuando no son factibles las inspecciones en servicio, se necesita un diseño más conservador de modo que cualquier defecto anticipado no crecerá hasta un tamaño peligroso durante la vida esperada del componente.

Corrosión por tensiones. La acción simultánea de una pieza sometida a tensiones repetitivas y a alguna forma de ataque por el medio en el que la pieza debe trabajar puede producir un fallo o rotura como consecuencia de la corrosión por fatiga. El efecto combinado de estos dos factores es mucho mayor que el efecto de uno u otro en solitario. La rotura normalmente comienza por defectos superficiales, poros o irregularidades. Estos puntos actúan como puntos de concentración de tensiones con el medio corrosivo intensificando la acción del picado. Cuando más repetitiva sea la tensión, más rápida será la acción del picado, que de nuevo incrementará la concentración de tensiones. Un efecto acumulativo puede materializar lo que producirá un fallo muy por debajo de la tensión prevista por resistencia o duración.

Los poros formados por la acción simultánea de la tensión y la corrosión son siempre más agudos y profundos que los poros formados al mismo tiempo bajo

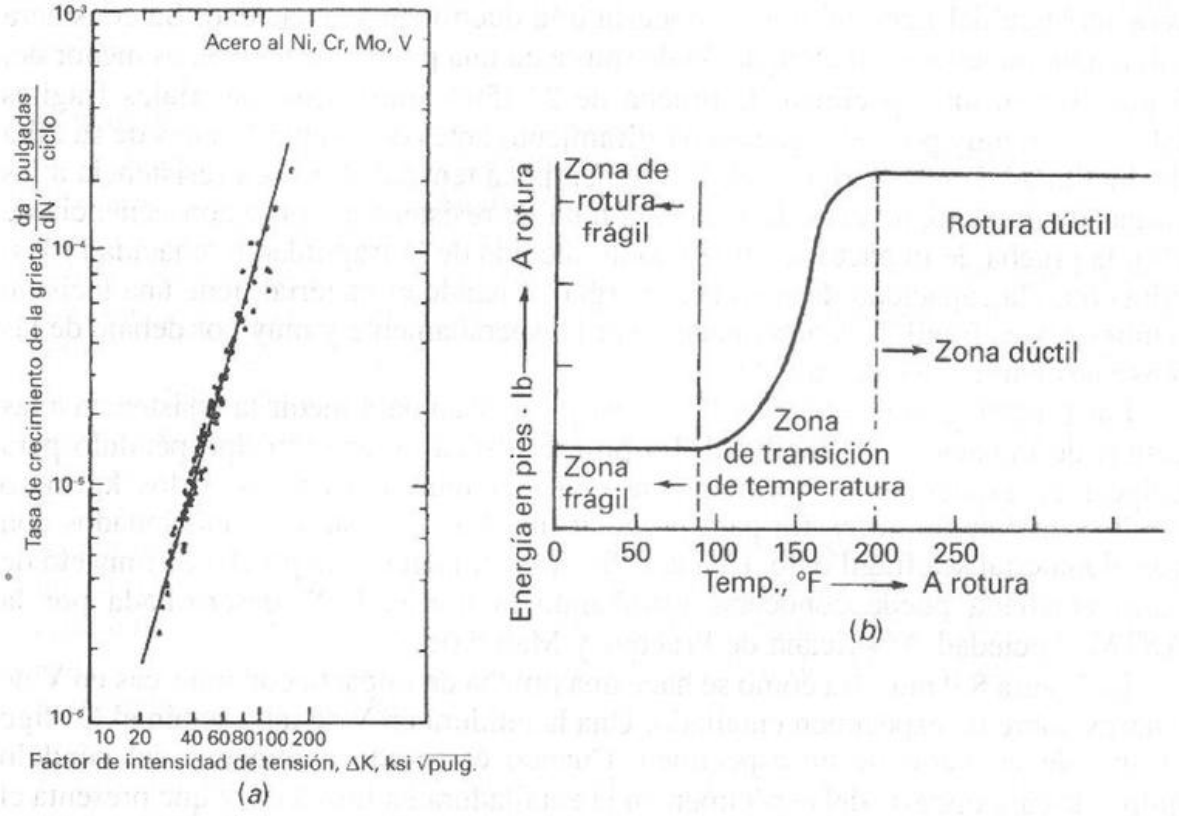


Figura 8.8. (*a*) Tasa de crecimiento de la grieta por fatiga en función de la intensidad en el borde de la grieta para un acero al níquel-cromo-molibdeno. (*b*) La zona de transición de temperatura es importante para ciertos aceros para determinar las propiedades de la rotura frágil y dúctil con el cambio de temperatura.

condiciones sin tensiones. Cuanto más repetitivas sean las tensiones, más rápida será la acción de picado. A una tensión repetitiva de ciclo bajo, el picado procederá enteramente por corrosión normal, y la sección fallará por rotura normal por tensión o cuando el área resistente se debilite de modo que la tensión crezca proporcionalmente, suponiendo una carga constante.

La *corrosión por tensiones* es, pues, producida fundamentalmente por las tensiones repetitivas de alta frecuencia en un medio corrosivo, desembocando en un picado causado por la tensión y corrosión. El picado pues desarrolla puntos de elevada concentración de tensiones que conduce a la rotura por fatiga.

No hay datos experimentales disponibles para determinar la extensión a la que se reduce el límite de resistencia o durabilidad para la mayoría de los materiales en combinación con soluciones o medios corrosivos. Pero para calderas y recipientes a presión, la precaución obvia a tomar contra la corrosión por tensiones es asegurarse de que el agua o medio confinado está libre de tendencias corrosivas. Esto se determina por análisis del agua a intervalos regulares por personal experto en análisis periódicos internos de las piezas sometidas a presión y el examen de las superficies en busca de evidencias de picadura y corrosión.

Pruebas de muesca en V de Charpy. *Materiales frágiles* son aquellos que comparativa o selectivamente son débiles en resistencia o tensión. La fragilidad es una

característica del material que es opuesta a la ductilidad y tenacidad. Se considera frágil a un material si su elongación de rotura en una prueba de tensión es menor del 5 por 100 en un espécimen de prueba de 2″ (50,8 mm). Los materiales frágiles fallarán con muy poca elongación o estiramiento antes de romper a causa de su falta de ductilidad. Los materiales frágiles tienen poca tenacidad o poca resistencia a las cargas de impacto, a veces denominada falta de resistencia; como consecuencia de ello, la prueba de impacto se utiliza como medida de la fragilidad o tenacidad (descrita como la capacidad de absorber energía). Cuando el material tiene una incisión o muesca y es frágil, la rotura puede venir inesperadamente y muy por debajo de las tensiones admisibles de cálculo.

Las pruebas con *muescas en V de Charpy* se usan para medir la resistencia a las cargas de impacto o la fragilidad. La prueba utiliza un aparato tipo péndulo para golpear en especímenes, normalmente con una mueca o entalla, y los kg·m (o pie-lbs) de energía necesaria para producir una fractura están correlacionados con que el material sea frágil o no. Una descripción completa de la prueba de impacto de barra entallada puede conocerse estudiando la norma E-23 desarrollada por la ASTM (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales).

La Figura 8.9 muestra cómo se hace una prueba de impacto con muescas en V de Charpy sobre un espécimen entallado. Una hendidura en V se talla según el Código en una de las caras de un espécimen. Cuando el pesado contrapeso del péndulo golpea la cara opuesta del espécimen en la entalladura en forma de V que presenta el espécimen, los kg·m necesarios (o pie-lbs) para causar la rotura se calculan por las relaciones del brazo de la palanca y el peso. Los aceros al carbono con resistencia en frío a la rotura por impacto son usualmente aceros calmados, o sea aceros que han sido desoxidados en su fabricación de modo que no haya evolución gaseosa durante la colada y solidificación. Los aceros al níquel de 3,5 ó 9 por 100 se consideran

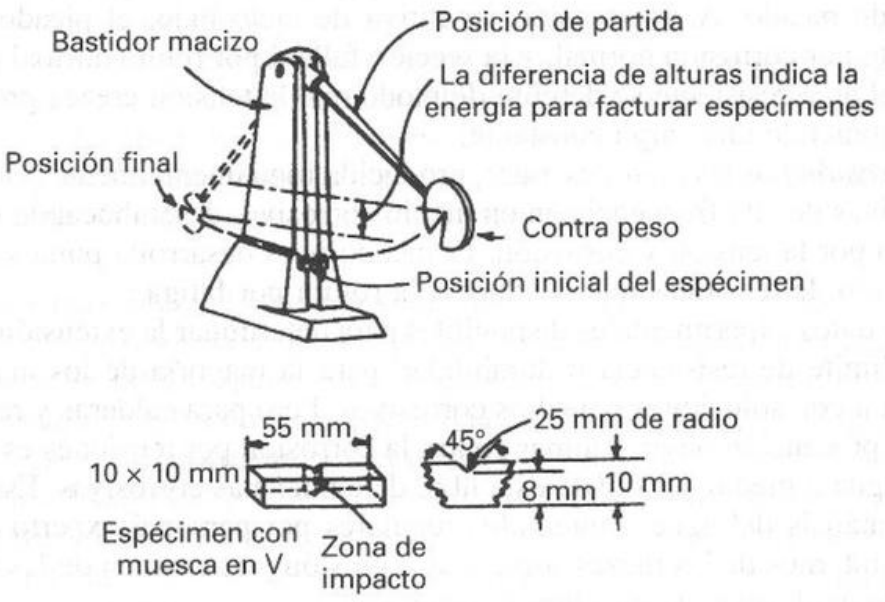


Figura 8.9. El test de Charpy sobre un espécimen con entalladura en V se utiliza para determinar la tenacidad contra la fractura frágil. (*Cortesía de Power magazine.*)

aceros de superior resistencia al impacto, como aceros austeníticos inoxidables que son.

Temperatura de nula ductilidad. El efecto de la temperatura alterando o cambiando la naturaleza frágil de un material se pone de manifiesto dramáticamente en la Segunda Guerra Mundial cuando los barcos mercantes se agrietaban inesperadamente. Fue digno de tener en cuenta que esto ocurría en aguas frías, pero no en aguas cálidas. Se estableció desde este momento (por estos fallos) que los metales podían mostrar un comportamiento dúctil en un ambiente normal pero actuar de un modo frágil si las características del medio ambiente, como la temperatura, cambiaban. La rotura por tensiones y corrosión puede ser también de naturaleza frágil como resultado de la acción combinada de tensiones, material susceptible y un medio ambiente corrosivo.

Los aceros de bajo contenido en carbono y las aleaciones de baja ley frecuentemente muestran una zona de transición del comportamiento dúctil al fallo frágil en un punto o rango de temperaturas denominado la *temperatura de nula ductilidad* (véase la Figura 8.8*b*). Cualquier fallo del material agravará la tendencia de un material con una característica de *ductilidad nula* a actuar de manera frágil por debajo de la temperatura de transición.

HAZ. La soldadura puede causar cambios en un material que lo hace actuar de modo frágil en la soldadura metálica o zona afectada por el calor (HAZ). Es pues importante determinar y considerar las temperaturas de transición de nula ductilidad del material a utilizar en calderas y recipientes a presión para estar seguro de que esta temperatura no será experimentada durante ningún servicio (no serán temperaturas a las que las calderas o recipientes a presión pueden estar expuestas, incluso durante posibles pruebas con anormalidades de operación). Una de estas posibilidades es la *prueba hidrostática* con el agua que puede estar por debajo de la temperatura de nula ductilidad. La otra son las pruebas que se realizan cuando la temperatura ambiente puede ser demasiado baja, como puede ocurrir en invierno. Los fallos son debidos a la fragilidad por no considerar el efecto de las transiciones de temperatura sobre las propiedades del material que hayan podido ocurrir en el equipo durante las pruebas hidrostática de presión y otras partes del equipo como las torres de enfriamiento de agua.

Otros efectos sobre los materiales. El *acortamiento* bajo tensión se define como la deformación lenta del material que tiene lugar a elevada temperatura sin incremento de la tensión. Las pruebas modernas de materiales incluyen la determinación de cuánto acortamiento o deformación permanente puede esperarse en un espacio de tiempo de modo que el diseño puede reflejar estos factores en la predicción de vida del recipiente a presión. Las propiedades o características del acortamiento bajo tensión se consiguen por imposición de una carga o tensión sobre un espécimen a una temperatura constante y después midiendo la elongación a intervalos de tiempo. Los datos se llevan a una gráfica para obtener unas curvas de tensión constante del acortamiento o elongación (alargamiento) o curvas a intervalos de tiempo constantes de elongación-tensión. Utilizando los datos de la elongación, el diseñador trata de establecer la vida en servicio esperada y los correspondientes cantidades de defor-

mación que pueden tolerarse. Una vez establecidas estas condiciones, puede seleccionarse la tensión que satisfaga estas condiciones.

La *fragilidad de hidrógeno* puede tener lugar bajo condiciones de trabajo de calderas y recipientes a alta presión y alta temperatura. El ataque del hidrógeno sobre los aceros puede dar lugar a pérdidas severas de ductilidad con desarrollo de grietas que pueden conducir a roturas inesperadas por fragilidad. El efecto es más severo sobre los aceros a elevada temperatura en las que el hidrógeno se difunde en el metal como hidrógeno atómico. Se recombina en el metal como hidrógeno molecular en las proximidades del grano y produce elevadas presiones en estos «vacíos» o «huecos» intercristalinos, dando como resultado abultamiento o ampollas. El hidrógeno también se combina con el carbono en el acero bajo elevadas presiones y temperaturas y descarboniza al acero, teniendo lugar o sobreviniendo la fragilidad. Con frecuencia se utilizan los aceros al cromo-molibdeno allí donde se requiere resistencia a la fragilidad de hidrógeno.

Las vasijas y recipientes a presión nucleares pueden estar sometidas a la irradiación de neutrones de su acero. Es necesario evitar las impurezas del acero así como los grandes tamaños del grano para limitar cualquier «vacío» o «hueco» en el material. La teoría dice que la radiactividad existente en los recipientes nucleares promueve la formación de helio, que, con el tiempo, se recoge y sitúa en las proximidades del grano para debilitarlo y disminuir la ductilidad del acero. El control de la calidad es pues más exigente sobre las vasijas y recipientes nucleares, de modo que las cavidades u oquedades deben ser eliminadas.

TENSIONES ADMISIBLES Y FACTOR DE SEGURIDAD

Las *tensiones admisibles* se usan para el diseño de estructuras o piezas de maquinaria. La tensión admisible se denomina también a veces tensión de trabajo admisible. Es la máxima tensión que se considera segura cuando el material está sometido a las cargas de servicio que deberían ser resistidas por el mismo. En las aplicaciones de calderas, el término *presión admisible* se utiliza a menudo. Actualmente, la tensión admisible se determina por aplicación de fuerzas que actúan sobre el material y calculando después la presión admisible a partir de la tensión admisible sobre el material.

La tensión admisible se halla a partir de la tensión máxima del material (o de la carga de rotura) dividida por un factor de seguridad. El factor de seguridad utilizado en el cálculo de modernas calderas es de 4. Sin embargo, ciertos elementos de las viejas calderas como las juntas roblonadas tienen que diseñarse con un factor de seguridad de 5. Otras partes o piezas tienen que diseñarse con un factor de seguridad tan elevado como 12,5, como en el caso de los remaches o roblones que sujetan tirantes sobre vigas o soportes en una caldera pirotubular horizontal.

En la utilización de cálculos para calderas, el factor de seguridad es la tensión máxima S_u dividida por la tensión admisible *Sa*. En forma de ecuación:

$$\text{factor de seguridad} = \frac{S_u}{Sa}$$

Otro método de expresar el factor de seguridad es dividiendo la presión de rotura por la presión admisible. Este método se utiliza en los informes de inspección y en los datos de los informes ASME. Puesto en forma de ecuación:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{Presión de rotura}}{\text{Presión admisible}}$$

En el diseño y utilización de calderas y otras estructuras críticas donde están en juego vidas humanas y daños a propiedades, hay una necesidad definida de seleccionar tensiones de trabajo y cargas que sean considerablemente menores que la tensión máxima o la carga de rotura por las siguientes razones:

1. Hay siempre algún grado de incertidumbre o riesgo en los materiales utilizados, en cómo se fabricaron, cómo se montaron y dónde y cuándo se unieron con otros materiales.
2. Hay siempre algo de riesgo e incertidumbre acerca de cómo una estructura, pieza o parte de ella va a ser cargada (con qué exactitud), cómo va a resistir o soportar las cargas y cómo se va a abusar de ella en el trabajo o servicio normal o extremo o de punta).
3. Los cálculos de todas las tensiones posibles en una estructura a construir nunca son todo lo exactos que uno considera cuando se estudian las variables que pueden surgir en un servicio con el transcurso de los años.

Ciertos materiales frágiles como la fundición no tienen un punto de rotura definido y determinado. De modo que las últimas normativas usan las tensiones máximas porque es mucho más fácil utilizarlas y aplicar un factor de seguridad para así obtener la tensión admisible. En algunos países de Europa el *límite elástico* es la base del diseño. El Código americano de recipientes nucleares (*Nuclear Vessel Code*) utiliza el límite elástico o límite de resistencia o ambos como base de diseño. Con el incremento del cambio tecnológico el Código de calderas puede también variar en esta materia y más en los tiempos que corren actualmente.

Sobre las instalaciones existentes, las cuestiones del factor de seguridad y la presión admisible afloran muy a menudo. Por ejemplo, ¿puede una caldera que fue diseñada originalmente con un factor de seguridad de 5, trabajar con un factor de seguridad de 4, ya que la última normativa de seguridad permite este factor de seguridad? Normalmente permanece el factor de seguridad original de 5. El factor de seguridad de 4 fue puesto principalmente para las calderas de acero estirado sin soldadura o para calderas soldadas que cumplan los registros de seguridad más severos de control e inspección de calidad. Las viejas calderas pueden no cumplir este requerimiento, pero el factor de seguridad original de 5 rige la presión admisible.

Si una caldera está timbrada para una presión admisible de 19 kg/cm^2 (275 psi) y la válvula de seguridad está tarada para 10,5 kg/cm^2, ¿cuál es el factor de seguridad? Se asume o supone que se cumplen los requisitos del Código de calderas y del último código de soldaduras y que el diseño original tiene un factor de seguridad de 4. La

presión de rotura de esta caldera sería de 4 × 19,25 kg/cm^2 = 77 kg/cm^2. De este modo:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{Presión de rotura}}{\text{Presión admisible}} = \frac{77}{10,5} = 7,33$$

Esta cuestión nos lleva a una consideración importante y es de qué presión utilizar en el cálculo de los factores de seguridad en instalaciones de calderas existentes. Por ejemplo, en esta cuestión, ¿se utilizaría la carga de ajuste de presión de la válvula de seguridad o se usaría la presión de timbre admisible? Si el ajuste de la válvula de seguridad está *por debajo* de la presión de trabajo máxima timbrada, úsese la cifra de ajuste de la válvula *de seguridad*. Si por casualidad la válvula o válvulas de seguridad están taradas a un valor más elevado que la presión admisible (por encima del límite del Código), en ese caso hay una situación de riesgo o peligro porque la válvula de seguridad siempre debe estar tarada por debajo de la presión admisible o presión de trabajo timbrado sobre la caldera.

El ajuste de la válvula de seguridad se utiliza en los cálculos allí donde la presión de timbre admisible está por encima del valor de ajuste de la válvula de seguridad y entonces la presión admisible en calderas es la de ajuste de la válvula de seguridad (es igual o menor, $P_{\text{admisible}} \leqslant P_{\text{válvula seguridad}}$). Se supone o asume que la caldera no trabaja por encima de esta presión de ajuste de la válvula de seguridad. Si se necesita un aumento de presión, otros ítems como tarado de válvulas y accesorios de unión tendrán que comprobarse antes de que la presión se aumente hasta el máximo de presión admisible timbrada sobre la placa de caldera. De ese modo puede necesitarse una válvula de seguridad nueva. También tendrá que comprobarse todo lo relativo al Código sobre tarado de válvulas y conexiones de los niveles para ver si cumplen los requisitos para la nueva presión.

La cuestión de si un factor de seguridad tiene continuidad o validez sobre una vieja caldera debe considerarse muy a menudo, especialmente allí donde debe evaluarse el coste de reparación o alteración de características del nuevo equipamiento a cambiar. La continuidad del factor de seguridad de una caldera depende del tipo de caldera, las condiciones en que se encuentra e incluso el estado o sitio donde está emplazada. Suponiendo que la inspección exterior e interior son satisfactorias, la Normativa Americana establece que:

1. Las solapas y juntas longitudinales de calderas trabajando a más de 50 psi (3,5 kg/cm^2) pueden operar a esta presión durante 20 años. Después, se permiten 3,5 kg/cm^2 o menos; pero si la caldera se cambia de emplazamiento sólo se permite una presión de trabajo baja (menor).
2. Para calderas de construcción por soldadura a tope, al final del año 25 y después cada 5 años, el factor de seguridad debe aumentarse en 0,5 (50 por 100) a no ser que se realice un test o prueba hidrostática a 1,5 veces la presión admisible; si esta prueba es satisfactoria, no es necesario ningún aumento del factor de seguridad.

La mejor regla a seguir en cualquier cambio del factor de seguridad es comprobarlo con un inspector de calderas o de la jurisdicción de industria. *Nunca* suponga

que la caldera puede trabajar a mayor presión por cambiar las válvulas de seguridad, incluso si la caldera está timbrada a una presión mayor. Hay otros requisitos a cumplir que deben tenerse en cuenta sobre agua de alimentación, purgado, conexiones de niveles y sus columnas de agua, corte por bajo nivel de agua en caldera y tarados de servicio de válvulas. Al determinar la presión admisible sobre una caldera, los cálculos de tensión deben hacerse como se muestra en los siguientes capítulos.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

1. ¿Cómo definiría el límite elástico de un material matemáticamente, siendo S = límite elástico en kg/cm^2; F = carga de rotura en kg/cm^2; a_f = sección final del espécimen (cilíndrico) en el punto de rotura; y a_i = sección inicial del espécimen (cilíndrico) en el punto de rotura?

   RESPUESTA:

   $$S = \frac{F}{a_i}$$

   La sección inicial se utiliza para la tensión del límite elástico.

2. Defina matemáticamente ductilidad, siendo los datos:

   A = porcentaje de reducción de la sección.
   a_i = sección inicial del espécimen.
   a_f = sección final del espécimen.

   RESPUESTA:

   $$A = \frac{a_i - a_F}{a_i} \times 100\ \%$$

3. Señale la diferencia entre rotura del material por fatiga de baja frecuencia y de alta frecuencia.

   RESPUESTA: La fatiga de baja frecuencia es una fatiga de tipo rotura que ocurre después de un relativamente bajo número de tensiones repetidas; por debajo de 10.000 ciclos es el rango normalmente aceptado. El fallo por fatiga de alta frecuencia requiere ciclos mayores de tensión repetitiva, normalmente por encima de los 100.000 ciclos de tensiones.

4. ¿Qué es tensión?

   RESPUESTA: Tensión es la resistencia a una fuerza externa que un material proporciona dentro de su estructura cristalina; se expresa en libras por pulgada cuadrada o en kg/cm^2 de área de la sección recta de corte.

5. ¿Cuál es la prueba más contundente utilizada para medir la resistencia de un material, su elasticidad y su ductilidad?

   RESPUESTA: La prueba de tracción es el test mecánico más comúnmente utilizado para determinar estas propiedades de un material.

6. ¿Qué es elongación referida a una prueba de material?

   RESPUESTA: Elongación es la medida de la deformación de un material bajo carga y se expresa como un incremento de longitud por unidad de longitud original de la pieza.

7. ¿Cuál es la denominación constante de proporcionalidad que existe entre la tensión y la deformación elástica?

RESPUESTA: Esta constante para una clase determinada de material se llama módulo de elasticidad *E*.

8. ¿Cómo definiría la máxima tensión elástica?

RESPUESTA: La máxima tensión elástica es la tensión que un material experimenta en una maquina de pruebas bajo la máxima carga soportada en la prueba. La máxima tensión se obtiene dividiendo esta carga máxima por el área original o sección recta del material o espécimen de prueba.

9. ¿Qué es la sensibilidad de impacto?

RESPUESTA: La sensibilidad de impacto o resistencia de impacto de un metal es su resistencia al inicio y propagación de una grieta en la base de una entalla normalizada. La sensibilidad al impacto se mide por la cantidad de energía absorbida en pies-libras o kg · m por un espécimen que se rompe bajo el impacto de un golpe de martillo que se produce por un péndulo de contrapeso normalizado. Los materiales frágiles absorberán poca energía en la rotura.

10. ¿Qué se entiende por fatiga?

RESPUESTA: Fatiga es la tendencia de un material a romper bajo condiciones de tensiones repetidas de tipo cíclico que son considerablemente menores que el límite elástico del material.

11. ¿Cómo se define la ductilidad?

RESPUESTA: La ductilidad de un metal es la cantidad de deformación permanente o elongación que puede soportar antes de que la rotura tenga lugar. Se usan dos métodos para definir o medir la ductilidad: el porcentaje de elongación y la reducción de sección de un espécimen probado bajo tensión. Las soldaduras se prueban para constatar su ductilidad mediante una prueba de doblado a flexión. Esta prueba consiste en el doblado o flexado de una muestra hasta una cantidad específica de flexión sobre un soporte normalizado de radio definido. El incremento de distancia entre dos marcas o señales hechas en el lado tensado del espécimen se anota, y el cambio o ganancia se expresa como porcentaje de elongación.

12. ¿Qué son materiales frágiles?

RESPUESTA: Éstos son materiales que pueden deformarse muy poco sin que tenga lugar la rotura. Ésta se caracteriza normalmente por un repentino y quebradizo tipo de rotura. La fundición, el hormigón, el ladrillo genérico y el vidrio son ejemplos de materiales frágiles.

13. ¿Qué son materiales resilientes?

RESPUESTA: Éstos son materiales que pueden absorber grandes cantidades de energía sin experimentar deformación permanente. Para expresarlo de otro modo, vuelven a su forma original después de reducirse la carga. Los materiales con bajo módulo de elasticidad y alto límite elástico producirían elevada resiliencia.

14. Defina los materiales tenaces.

RESPUESTA: Los materiales tenaces pueden absorber grandes cantidades de energía sin romper. Esta cualidad se relaciona con los materiales de alta resistencia y alta ductilidad o flexibilidad. La tenacidad es una medida útil de la capacidad de un material para absorber cargas de choque o golpes repentinos sin ruptura.

15. Cite algunas impurezas ambientales que puedan entrar a una caldera de vapor o al sistema de agua y que pueden producir grietas o tensiones de corrosión en un acero de elevada resistencia de una turbina.

RESPUESTA: Las siguientes materias han sido identificadas como posibles causas de grietas de corrosión por tensión en álabes de turbina:

1. Utilización del tratamiento con fosfato descoordinado con un control impropio o inadecuado, que puede producir causticidad libre, que a su vez puede atacar el metal.
2. Sodio introducido en el agua de caldera a partir de una perdida de tubos del condensador.
3. Agua tratada inadecuadamente y utilizada en los atemperadores para control del realimentador o sobrecalentador.

16. ¿Qué produce tensiones térmicas?

RESPUESTA: Las tensiones térmicas se producen cuando un material no está libre para dilatarse o contraerse por efecto de los cambios de temperatura a los que el material en servicio puede estar sometido. La tensión resultante que se desarrolla puede hallarse mediante la ecuación:

$$S = E \cdot a \cdot (t_2 - t_1)$$

donde, E = módulo de elasticidad del material.
a = coeficiente de dilatación del material.
t_1 y t_2 = temperaturas inicial y final, respectivamente.

17. ¿Cuál puede ser el efecto de la deformación bajo tensión en una estructura metálica?

RESPUESTA: La deformación por efecto de las tensiones produce unos planos por deslizamiento o movimiento lento en la estructura cristalina de un material que también son función del tiempo. Este movimiento lento o resbalamiento puede producir suficiente deformación como para originar una rotura repentina incluso cuando la tensión aplicada es mucho menor que la que normalmente podría originar una rotura bajo condiciones normales de carga.

18. ¿Qué relación define el término *factor de concentración*?

RESPUESTA: El factor de concentración de tensiones es la relación de la tensión real existente sobre un plano de una pieza bajo carga a la tensión de cálculo necesaria para resistir esa carga sin tener en cuenta la discontinuidad que producen las tensiones normales al ser magnificadas (aumentadas) por el factor de concentración de tensiones.

19. ¿Cómo se define la relación de Poisson?

RESPUESTA: Por debajo del límite elástico, un material sometido a carga se alargará longitudinalmente por la tensión y disminuirá su sección diametral (sección recta). La relación de la tensión unitaria normal a la sección recta normal a la tensión unitaria en la

dirección del esfuerzo longitudinal se denomina *relación de Poisson*, y se expresa como sigue:

$$\text{Módulo de Poisson} = \text{relación de Poisson} = u = \frac{e_t}{e_s}$$

donde: e_t = tensión unitaria en dirección normal al esfuerzo.
e_s = tensión unitaria en la dirección del esfuerzo.

20. ¿Una barra cilíndrica de 1/2″ (12,7 mm) de diámetro estira 0,00195″ (0,04953 mm) en una longitud de 2″ (50,8 mm) y disminuye 0,000162″ ($4{,}1148 \times 10^{-3}$ mm) de diámetro cuando se la somete a una tensión (tracción) de 2.000 Lbs (908 kg). ¿Cuál es la relación o módulo de Poisson?

RESPUESTA:

$$e_s = \frac{0{,}04953}{50{,}8} = 0{,}000975$$

$$e_t = \frac{0{,}0041148}{12{,}7} = 0{,}000324$$

$$\text{Relación de Poisson} = \frac{e_t}{e_s} = \frac{0{,}000324}{0{,}000975} = 0{,}332$$

21. Calcular la tensión unitaria del espécimen de la pregunta anterior.

RESPUESTA:

$$s = \frac{P}{a} = \frac{908 \text{ kg}}{\pi \cdot (1{,}27^2/4) \text{ cm}^2} = \frac{908}{1{,}266 \text{ kg/cm}^2} = 716{,}8 \text{ kg/cm}^2$$

22. Un espécimen tiene un módulo de elasticidad de 6,5 millones (455.000 kg/cm^2). ¿Cuál es la máxima carga axial que puede aplicarse a una barra de 1/2″ (12,7 mm) de diámetro sin deformarla (sin estirarla) 1/16″ (1,5875 mm) en una longitud de 6 ft (1,8288 m).

RESPUESTA: Utilizando:

$$E = \frac{F/a}{e/l} \qquad F/a = \frac{E \cdot e}{l} \qquad F = \frac{E \cdot e \cdot a}{l}$$

y resolviendo para F:

donde: F = carga
a = área de la barra = $\pi \varnothing^2/4 = \pi 12{,}7^2/4 = 126{,}677 \text{ mm}^2 = 1{,}266 \text{ cm}^2$
e = 1/16″ = 25,4/16 mm = 1,5875 mm = 0,1587 cm
l = 1,8288 m = 1.828,8 cm
$F = (455.000 \text{ kg/cm}^2 \cdot 0{,}1587 \text{ cm} \cdot 1{,}266 \text{ cm}^2)/1.828.8 \text{ cm} = 500{,}03 \text{ kg}$
$F = (6.500.000 \text{ lbs/in}^2 \cdot 1/16 \text{ in } (\pi \cdot 0{,}5^2/4) \text{ in}^2)/(6 \cdot 12) \text{ in} = 1.107{,}31 \text{ lbs}$

23. ¿Cuánto cambia el diámetro de una barra cilíndrica de 2″ (50,8 mm) de diámetro si se le impone una carga axial de 6.000 lbs (27.240 kg) y la relación o módulo de Poisson es de 0,30?

RESPUESTA:

$$S = \text{Tensión axial} = 27.240 \text{ kg} \frac{\pi \cdot 5{,}08^2}{4 \text{ cm}^2} = \frac{27.240}{20{,}268 \text{ kg/cm}^2} = 1.343{,}97 \text{ kg/cm}^2$$

Utilizando $E = 2.100.000$ kg/cm^2 para el acero:

$$E = \frac{S}{\varepsilon}$$

$$\varepsilon = \text{elongación axial} = \frac{S}{E} = \frac{1.343{,}97 \text{ kgcm}^2}{2.100.000 \text{ kg/cm}^2} = 6{,}39985 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Módulo de Poisson} = u = \frac{e_t}{e_s}; \quad e_t = u \cdot e_s = 0{,}3 \cdot 6{,}39985 \cdot 10^{-4} = 1{,}919955 \cdot 10^{-4}$$

Cambio o disminución en 2″ de diámetro = 50,8 mm · u =
= 50,8 mm · $1{,}919955 \cdot 10^{-4}$ = 0,00975 mm

24. ¿Cómo se determina el límite de tenacidad de un material?

RESPUESTA: El límite de tenacidad de un material se determina en varios especímenes de prueba a cargas repetidas, que producen tensiones completas (con vuelta al estado original) de valores conocidos y registrados; es el número de tensiones con vuelta al estado original que cada espécimen resiste antes de romperse. Cada espécimen se somete a una tensión menor que la precedente y también rompe al cabo de un gran número de ciclos de tensión. Finalmente, se busca una tensión que no produce rotura sin tener en cuenta el número de ciclos aplicados. Esta tensión se denomina limite de tenacidad del material sometido a prueba.

25. ¿Qué carga, además de la tensión interna, hay que evaluar según el código ASME de calderas de alta presión?

RESPUESTA: Las cargas que deben considerarse incluyen el efecto del peso del agua y tensiones impuestas o aplicadas a una caldera durante la prueba hidrostática, así como cualquier carga adicional que incrementará la tensión media por encima de la presión de trabajo y tensiones inducidas en más del 10 por 100 de la tensión de trabajo admisible. Estas cargas pueden incluir viento, nieve y cargas sísmicas como se especifica en las normativas nucleares. También incluyen la reacción de los pilares soporte, anillos, apoyos y tipos similares de soporte.

26. ¿Quién debe preparar los informes de tensiones para las vasijas y recipientes a presión nucleares?

RESPUESTA: El fabricante del recipiente a presión es responsable de la preparación del informe de tensiones y debe ser revisado por el propietario de la planta y, en la mayoría de los casos, por una agencia de inspección.

27. ¿Qué grandes líneas directrices hay que estipular para hacer un informe de tensiones?

RESPUESTA: El informe de tensiones debe prepararse y firmarse por ingenieros profesionales expertos en diseño de recipientes a presión. Generalmente tiene tres secciones: análisis térmico, análisis estructural y evaluación de fatiga. Es de interés el hecho de que

deben contemplarse en el informe aquellas zonas de condiciones de las más severas tensiones en algún régimen transitorio, incluyendo los valores de las tensiones.

28. ¿Cuál es el objeto de la prueba de tensiones en la sección reducida, de la prueba de doblado o flexión libre, de la prueba de flexión de la soldadura raíz y de la prueba de flexión frontal y flexión lateral?

RESPUESTA: Estas pruebas se requieren para cualificar procedimientos de soldadura y de soldadores según los registros del código ASME:

a) Una prueba de sección reducida es un procedimiento de cualificación. Cuando la sección rompe en tensión tendrá una resistencia de tracción al menos del mínimo del rango de la chapa que se va a soldar o ha sido soldada, y su elongación o alargamiento será del 20 por 100 mínimo en 2″ (50,8 mm).
b) Una prueba de flexión o doblado libre es un procedimiento de cualificación. Consiste en la flexión o doblado de un espécimen en frío; las fibras exteriores de la soldadura tendrán una elongación al menos del 20 por 100 antes de que ocurra la rotura.
c) Una prueba de flexión de soldadura raíz se hace para la cualificación de los soldadores. Consiste en el doblado de un espécimen contra o por la parte interior de la soldadura.
d) Una prueba de cara o de flexión frontal se efectúa para cualificación de soldadores. Consiste en la flexión del espécimen contra o por la superficie de la soldadura.
e) Una prueba de flexión lateral se hace para cualificar soldadores. Consiste en el doblado flector del espécimen contra o por la parte lateral de la soldadura.

29. ¿Cómo se define la corrosión por fatiga?

RESPUESTA: Ésta es una rotura producida por la acción combinada de tensiones repetitivas sobre un material y en un ambiente corrosivo pero a menores niveles de tensiones o menor número de ciclos de los que se requerirían para producir una rotura por fatiga sin la presencia de un ambiente corrosivo.

30. ¿Cite tres pruebas de dureza aplicada a metales que se han soldado?

RESPUESTA: Brinell, Rockwell y Vickers.

31. ¿Qué tipo de fractura se analiza normalmente mediante la prueba de impacto sobre espécimen con muesca?

RESPUESTA: Las pruebas de impacto se usan para analizar las posibilidades de fallo de los aceros ferríticos por rotura frágil.

32. Enumere las pruebas destructivas normalmente llevadas a cabo sobre aceros ferríticos para investigar la temperatura de transición de nula ductilidad para determinar las propiedades de ductilidad de los aceros ferríticos a baja temperatura.

RESPUESTA: La prueba del golpe de contrapeso se usa para determinar la resistencia a la rotura del acero de 3/4″(19 mm) de espesor y superiores a diferentes temperaturas con el acero al que se le ha practicado una muesca donde se pueda iniciar la factura.

33. ¿Qué es una prueba de Charpy con muesca en V?

RESPUESTA: Esta prueba sirve para determinar la resistencia de un material a las cargas de impacto por choque o fallo por rotura frágil, iniciada por una muestra en V que tiene

el espécimen. La prueba determina la energía requerida para romper un espécimen normalizado con muestra en V central que está soportado en sus dos extremos y que así se compara con la normativa establecida. El código ASME de calderas exige esta prueba para muchos materiales de construcción de calderas como se especifica en la Sección II.

34. ¿Cómo se define una rotura por tensión-corrosión?

RESPUESTA: La rotura se produce bajo carga y tensión mantenida con una acción acompañante corrosiva que produce una rotura muy por debajo de la tensión normal del material.

Capítulo 9

CÁLCULOS DE RESISTENCIA, TENSIONES Y PRESIONES ADMISIBLES

En el Capítulo 8 se han revisado algunos principios básicos de resistencia de materiales y las tensiones principales que un material sometido a carga debe resistir. Este capítulo está dedicado a los cálculos de resistencia aplicados a las calderas de alta presión según el código ASME. Se calcularán de modo similar las ecuaciones que expresan la resistencia de chapas y superficies arriostradas y componentes semejantes de calderas de baja presión y recipientes a presión, pero las ecuaciones específicas están disponibles en la sección correspondiente del código ASME de calderas. Los métodos de cálculo de resistencia de calderas demuestran cómo hacerlo. Debe reconocerse que los nuevos materiales, el mejor control de calidad de fabricación y el aumento de conocimientos de cómo los materiales se comportan bajo carga, continuará produciendo cambios en las ecuaciones y tensiones admisibles. Además, la última edición de las normativas (código ASME en EE. UU., normativa UNE sobre diseño y construcción de calderas en España, normas 9-300-90 y el «Reglamento de Aparatos a Presión e Instrucciones Técnicas Complementarias» del Ministerio de Industria y Energía) debería consultarse para conocer los detalles de diseño específicos.

Secciones del código ASME y de la normativa UNE aplicables. Para obtener las últimas ecuaciones y reglas de cálculos, deberá usarse como material de referencia:

Sección I: Reglas para la construcción de calderas. En España, además, las normas UNE 9-300-90 editadas por AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Esto además del siempre básico «Reglamento de Aparatos a Presión e Instrucciones Técnicas Complementarias» del MINER.

Sección II: Materiales, partes A, C y D.
Código ASME de tuberías, parte: B31.1.
Código de Inspección del National Board y, nuevamente en España, el «Reglamento de Aparatos a Presión e Instrucciones Técnicas Complementarias» del MINER.

Análisis de componentes. Toda caldera y sus partes sometidas a presión deben analizarse componente por componente para cuidadosamente considerar la tensión del material que esté siendo utilizado, sus características físicas como tipo y clase de material, tensión admisible, espesor, etc. Deben analizarse las fuerzas que actúan sobre este material. Esta fuerza se crea normalmente por la presión pero puede también incluirse la temperatura, el peso que está soportando y la concentración de tensiones, como la existente alrededor de una abertura. El problema después evoluciona al comparar las fuerzas actuantes sobre el material y determinar si el material está siendo sometido a esfuerzos más allá de la tensión admisible determinada por la normativa de calderas. Los elementos a considerar dependen del tipo de caldera pero generalmente incluyen chapas o virolas, calderines, tubos, fondos esféricos, cabezales, superficies planas, riostras, tirantes, aberturas, hogares, juntas soldadas (remachadas en el pasado), soporte de estructuras y tuberías y válvulas de conexión. Cada uno de estos elementos está regido por el Código de calderas y recipientes a presión como material admisible, con tensiones admisibles y método de calcular los esfuerzos para obtener la presión admisible. Finalmente en las aplicaciones de calderas y recipientes a presión, el elemento más débil que produce la mínima presión, determina la *presión admisible* en la caldera.

Instalaciones existentes. Existe una vieja regla que dice que la presión admisible de una caldera que se basa en los requerimientos del Código prevalece cuando la caldera está construida. Con relación al cálculo de la presión admisible en este capítulo, la idea del autor es mostrar las ecuaciones de las instalaciones existentes y utilizadas hasta 1986, y los *nuevos requerimientos* del Código de 1986*. Esto ayudará al lector a determinar las presiones y tensiones admisibles para la recolección y resolución de preguntas y cuestiones sobre calderas que pueden surgir.

Las revisiones en los cálculos, basados en los cambios de 1986, incluyen:

1. Las juntas soldadas longitudinales deben tener cubrejuntas o chapas de refuerzo a intervalos y el refuerzo de la soldadura sustancialmente nivelado con la chapa. Anteriormente la normativa permitía esto como refuerzo de soldadura, pero la eficiencia permitida por la soldadura era sólo del 90 por 100.
2. Los cálculos en las piezas o componentes de las calderas de tubos de humos tales como tubos y virolas-hogares ahora requieren la utilización de la presión exterior y nuevas ecuaciones para determinar la presión admisible (norma UNE 9-300-90/3).

---

* *N. del T.:* Por ejemplo, «Reglamento de Aparatos a Presión e Instrucciones Técnicas Complementarias» del MINER y la Normativa UNE 98-300-90/3, de 1990, de AENOR.

3. La construcción de calderas roblonadas (remachadas) está permitida todavía, pero el Código actual hace referencia a la edición de 1971 de la Sección I para más detalles sobre calderas roblonadas. (Esto indica que la construcción roblonada está básicamente obsoleta*.)

La *presión manométrica* o efectiva se usa en la mayoría de los cálculos de presión admisible, porque ésta es la presión marcada en los manómetros en servicio. La presión manométrica es la presión por encima de la presión atmosférica, normalmente expresada como 1 atm o 1,033 kg/cm^2 (14,7 psi = 1,029 kg/cm^2) al nivel del mar (1.033 milibares). La presión absoluta es la presión *total* por encima de la atmosférica: por ejemplo, 100 psi (7 kg/cm^2) de presión manométrica es igual a 114,7 psi (8,029 kg/cm^2) de presión absoluta. En general, presión absoluta = presión manométrica + 1 atm (0,1 kg/cm^2).

Hay también una diferencia entre presión admisible y presión de trabajo u operativa. Las calderas operan siempre por debajo de la máxima presión admisible para evitar la apertura de la válvula de seguridad ya que una o dos válvulas deben estar taradas a la máxima presión admisible. La experiencia indica que el diferencial siguiente entre presión de trabajo y presión admisible evitará la apertura de la válvula de seguridad:

Máxima presión admisible	*Diferencial de presión de trabajo*
Hasta 100 psi (7 kg/cm^2)	10 %, pero no menos de 10 psi (0,7 kg/cm^2)
De 300 hasta 1.000 psi (de 7 y hasta 70 kg/cm^2)	7 %, pero no menos de 35 psi (2,45 kg/cm^2)
De 1.000 hasta 2.000 psi (de 70 a 140 kg/cm^2)	5 %, pero no menos de 80 psi (5,6 kg/cm^2)
Más de 2.000 psi (140 kg/cm^2)	Recomendación del fabricante

Normativa de tubería exterior a la caldera. Se requiere una certificación sobre el proyecto de caldera y/o inspección y aprobación por la Consejería de Industria de la Autonomía (en EE. UU., certificación del código ASME o inspección y aprobación por un inspector autorizado) tanto sobre la propia caldera como sobre la instalación de tuberías externas a la caldera. Esto comprende proyectos y formularios presentados y aprobados con la caldera prevista de su placa de reconocimiento oficial estampada. La tubería externa de la caldera comprende las conexiones adecuadas para la(s) válvula(s) exigidas por el Código sobre esas tuberías, tales como salida de vapor, alimentación de agua a caldera, purga, drenajes, venteos, purga superficial, columnas de agua del nivel, vidrio de visión del nivel, manómetro de presión y la línea de retorno de la circulación del agua para una caldera de agua sobrecalentada.

Esta tubería externa clasificada está diseñada y determinada en lo que respecta al material, fabricación, instalación, inspección y presiones admisibles normalizadas según normativa (por ejemplo, ASME B31.1, Código de Tuberías de Potencia) y también se hace referencia a las clases de material en la Sección I y/o en los Artícu-

---

* *N. del T.:* Y la prueba también es que la norma UNE 9-300-90/3 no hace mención alguna a la solución roblonada, sino solamente a la soldada.

los 18, 19 y en la Institución Técnica Complementaria ITC MIE AP2 de tuberías para fluidos relativos a calderas (6-10-1980, BOE 4-10-80) obligatorios en España. Otras tuberías del interior de las calderas o para tubos de más de 5″ (125 mm) de diámetro exterior requieren la utilización de las ecuaciones para calderines o virolas cilíndricas (Sección I del código ASME, en EE. UU., y Sección 5.9.1.5. de la norma UNE 9-300-90, en España).

Estas normativas dan detalles sobre las uniones o juntas aceptables de tuberías; sin embargo, no se puede utilizar las juntas roscadas allí donde puede haber corrosión severa, grietas por corrosión, choque o vibración, ni a temperaturas por encima de 496 °C. El mayor diámetro de tubería roscada es 3″ (76 mm) y la máxima presión admisible por tamaño o diámetro de tubería roscada para vapor y agua caliente u otro fluido con temperaturas por encima de 104 °C es:

Máximo diámetro de tubería roscada		*Máxima presión*	
pulgadas	mm	psi	kg/cm^2
3″	76	400	28
2″	50	600	42
1″	25	1.200	84
3/4″ y menores	19	1.500	105

La tabla de la Figura 9.1 suministra datos de la Asociación Americana de Normativa para Tuberías de Acero. La ecuación para tuberías B31.1 ilustrará sobre cómo determinar la presión admisible en una tubería exterior según el Código.

Problema. Una tubería de vapor, que va desde la propia caldera a dos válvulas de corte con finales planos para soldar a la caldera de 1.200 psi (84 kg/cm^2), es de diámetro nominal 6″, norma 80 y, según el cuadro Figura 9.1 muestra, tiene un espesor de 0,432″ (10,9 mm). El material del tubo es A210C según B31.1. La temperatura de trabajo no excede los 370 °C. ¿Cuál es la *presión admisible* si se permite una tolerancia de 1/16″ (1,6 mm) para la corrosión?

Solución. El Código exige que la tensión admisible para el material no sea mayor que la correspondiente a la temperatura del vapor; por tanto, de la tabla de tensiones B31.1, la tensión permisible para el material A210C es de 16.600 lb/in^2 (1.162 kg/cm^2). La ecuación a utilizar según B31.1 es:

$$P = \frac{2S(t_m - A)}{D_0 - 2y(t_m - A)}$$

donde

P = presión de diseño o presión interna admisible, psi.
t_m = mínimo espesor de pared requerido, pulgadas.
t_m = 0,432″ − 1/16″ = 0,432″ − 0,0625″ = 0,3695″
D_0 = diámetro exterior del tubo, pulgadas.
D_0 = 6,625″ de la Figura 9.1.
S = máxima tensión admisible para el material, lb/in^2
S = 16.600 lb/in^2.
y = un factor normativo para acero ferrítico o austenítico basado en la temperatura de diseño.

Tamaño nominal	Diámetro externo, pulgadas	Peso de tubería normal A.S.A. Norma 40										Extra fuerte A.S.A. Norma 80		Doble extra fuerte	
		Diámetro interno, pulgadas	Espesor de pared, pulgadas	Peso por pie extremos planos, libras	Roscas por pulgada	Circunferencia, pulgadas		Área transversal, pulgadas^2		Longitud de la tubería por pie^2		Espesor de pared, pulgadas	Peso por pie extremos planos, libras	Espesor de pared, pulgadas	Peso por pie extremos planos, libras
						Externa	Interna	Externa	Interna	Superficie exterior	Superficie interior				
1/8	0,405	0,269	0,068	0,244	27	1,272	0,845	0,129	0,057	9,431	14,199	0,095	0,31	—	—
2/4	0,540	0,364	0,088	0,424	18	1,696	1,144	0,229	0,104	7,073	10,493	0,119	0,54	—	—
3/6	0,675	0,493	0,091	0,567	18	2,121	1,549	0,358	0,191	5,658	7,748	0,126	0,74	—	—
1/2	0,840	0,622	0,109	0,850	14	2,639	1,954	0,554	0,304	4,547	6,141	0,147	1,09	0,294	1,71
3/4	1,050	0,824	0,113	1,130	14	3,299	2,589	0,866	0,533	3,637	4,635	0,154	1,47	0,308	2,44
1	1,315	1,049	0,133	1,678	11 1/2	4,131	3,296	1,358	0,864	2,904	3,641	0,179	2,17	0,358	3,66
1 1/4	1,660	1,380	0,140	2,272	11 1/2	5,215	4,335	2,164	1,495	2,301	2,768	0,191	3,00	0,382	5,21
1 1/2	1,900	1,610	0,145	2,717	11 1/2	5,969	5,058	2,835	2,036	2,010	2,372	0,200	3,63	0,400	6,41
2	2,375	2,067	0,154	3,652	11 1/2	7,461	6,494	4,430	3,355	1,608	1,847	0,218	5,02	0,436	9,03
2 1/2	2,875	2,469	0,203	5,793	8	9,032	7,757	6,492	4,788	1,328	1,547	0,276	7,66	0,552	13,70
3	3,500	3,068	0,216	7,575	8	10,996	9,638	9,621	7,393	1,091	1,245	0,300	10,25	0,600	18,58
3 1/2	4,000	3,548	0,226	9,109	8	12,566	11,146	12,566	9,886	0,954	1,076	0,318	12,51	0,636	22,85
4	4,500	4,026	0,237	10,790	8	14,137	12,648	15,904	12,730	0,848	0,948	0,337	14,98	0,674	27,54
5	5,563	5,047	0,258	14,617	8	17,477	15,856	24,306	20,006	0,686	0,756	0,375	20,78	0,750	38,55
6	6,625	6,065	0,280	18,974	8	20,813	19,054	34,472	28,891	0,576	0,629	0,432	28,57	0,864	53,16
8	8,625	7,981	0,322	28,554	8	27,096	25,073	58,426	50,027	0,443	0,478	0,500	43,39	0,875	72,42
10	10,750	10,020	0,365	40,483	8	33,272	31,479	90,763	78,855	0,355	0,381	—	—	—	—
12	12,750	12,000	0,375	49,562	8	40,055	37,699	127,676	113,097	0,299	0,318	—	—	—	—

Los tamaños de tubería de 14 pulgadas y superiores se designan por el diámetro exterior y el espesor de pared, si éste está especificado.

Figura 9.1. Datos de *American Standard Asociation* para tuberías de acero.

$y = 0{,}4$
A = espesor adicional para erosión o cargas impuestas de soporte.
$A = 0{,}050$ (estimado).

Sustituyendo en la ecuación anterior.

$$P = \frac{2(16.600)(0{,}3695 - 0{,}05)}{6{,}625 - 2(0{,}4)(0{,}3695 - 0{,}05)} = 1.665 \text{ psi} = 116{,}55 \text{ kg/cm}^2$$

Por tanto, la tubería tiene espesor suficiente para soportar una presión de trabajo de 1.200 psi (84 kg/cm^2).

TUBOS DE CALDERA

Se usan tres métodos normales de fabricación de tubos de calderas:

1. El tubo sin soldadura (sin costura) que se perfora en caliente y se estira a su tamaño.
2. El tubo soldado a solape (en forja) que consiste en una tira metálica («estirada») curvada a la forma tubular con el cierre longitudinal por solape. Se le aplica calor y la junta queda soldada de forja.
3. El tubo soldado a tope por resistencia eléctrica se forma como el segundo tipo pero, como su nombre implica, la junta se suelda a tope (no a solape).

Se considera una buena práctica por algunos colocar la soldadura de los tubos soldados fuera de la acción radiante de la llama o fuego del hogar. Los tubos para las calderas de tubos curvados se curvan normalmente a máquina.

El diámetro de los tubos de caldera siempre se refiere al diámetro nominal exterior mientras que el diámetro de tuberías se refiere siempre al diámetro nominal interior.

Extremos del tubo: expansionado, mandrilado y achaflanado. Prácticamente todos los tubos de caldera tienen los extremos expandidos contra el orificio de la chapa virola o calderín. Esto se hace para conseguir estanqueidad del tubo contra fugas y darle un agarre firme en el orificio de forma que el tubo pueda tener una sujeción definida o efecto de arriostrado.

Los bordes de los orificios o agujeros de alojamiento están achaflanados aproximadamente 1/16″ (0,0625″) después de su taladrado de forma que no tengan bordes agudos que puedan cortar al tubo cuando éste se expansione.

Los orificios o taladros son mayores en 1/32″ (0,03125″) mayores en diámetro sobre el diámetro exterior del tubo de caldera, excepto en las placas para los tubos de las calderas pirotubulares. A través de estas placas, los tubos deben parar durante el reentubado y, así, sus orificios o alojamientos en las placas serán 1/16″ (0,0625″) más grandes en diámetro para así permitir que su recubrimiento protector con suciedad sea eliminado sin daño para la placa de tubos.

Los calderines de gran espesor de virola deben estar contrataladrados (o contorneados los talados) para tener una razonable y estrecha banda circunferencial del tubo para expansión o dilatación. El diámetro del achaflanado debería ser suficiente para permitir el mandrilado y achaflanado del final del tubo según lo requiera.

El achaflanado o contorneado del taladro puede hacerse por el exterior o por el interior. Cuando un calderín de una caldera de tubos de agua tiene los tubos agrandados o expandidos en su parte superior, la mejor práctica es no utilizar el achaflanado exterior, para evitar bolsas o dobleces así formados donde se depositaría el hollín.

Para las calderas de tubos de agua los tubos y las conexiones deberían alargarse de 1/4″ (6,35 mm) a 3/4″ (19,05 mm) más allá del agujero de alojamiento y achaflanarlo al menos 1/8″ (3,175 mm) más grande que el diámetro del orificio de alojamiento.

Las calderas de tubos de humos tienen los finales de los tubos expuestos al calor y productos de combustión y, así, los finales del tubo se quemarían rápidamente si estuvieran achaflanados. En estas calderas, los finales del tubo se retrotraen en burlete o retocan hacia atrás después de haberlos mandrilado, para protegerlos contra el recalentamiento, aunque el apoyo en burlete (o esfera) no debe incrementar la fuerza de fijación del tubo apreciablemente.

Presión admisible en las calderas de tubos de agua. Para calcular la presión admisible en los tubos de las calderas de tubos de agua hasta 5″ (125 mm) de diámetro exterior, se utilizará la siguiente ecuación normalizada según el Código:

$$P = S\left[\frac{(2t - 0{,}01D - 2e)}{D - (t - 0{,}005D - e)}\right]$$

o:

$$t = \frac{PD}{2S + P} + 0{,}005D + e$$

donde: P = máxima presión admisible, psi (kg/cm^2).
D = diámetro exterior de los tubos, pulgadas (cm).
t = espesor mínimo requerido, pulgadas (cm).
S = tensión máxima admisible, lb/in^2 (kg/cm^2).
ke = factor de espesor para los finales expandidos de los tubos.

Nota. Para seleccionar el valor de S de los tubos, la temperatura de trabajo del metal no será menor que la temperatura media de la pared del tubo (suma de la temperatura exterior e interior del tubo dividido por 2). Ésta en ningún caso se tomará menor que 700 °F (371 °C). Para tubos que no absorben calor, la temperatura de la pared puede tomarse como la temperatura del fluido dentro del tubo, pero no menor que la temperatura de saturación del vapor.

Nota. En una longitud al menos igual a la longitud del asiento más 1″ (25,4 mm), e es igual a 0,04 para tubos expandidos en los asientos tubulares (zonas de sujeción

en placa). Sin embargo, $e = 0$ para tubos expandidos en los asientos de tubo, supuesto que el *espesor* de los finales del tubo sobre una longitud del asiento más 1″ (25,4 mm) *no* es menor que los valores siguientes:

- 0,095″ (2,413 mm) para tubos de $1^1/_4$″ (31,75 mm) de diámetro exterior y menores.
- 0,105″ (2,667 mm) para tubos mayores de $1^1/_4$″ (31,75 mm) de diámetro exterior hasta 2″ (50,8 mm).
- 0,120″ (3,048 mm) para tubos mayores de 2″ (50,8 mm) de diámetro esterior hasta 3″ (76,2 mm).
- 0,135″ (3,429 mm) para tubos mayores de 3″ (76,2 mm) de diámetro exterior hasta 4″ (101,6 mm).
- 0,150″ (3,810 mm) para tubos mayores de 4″ (101,6 mm) de diámetro exterior hasta 5″ (127 mm).
- Para tubos soldados por resistencia a calderines y cabezales o cajas, $e = 0$.

La Figura 9.2 muestra una tabla típica de tensiones admisibles para diferentes materiales de tubo a diferentes temperaturas. La Sección II, en su parte D, del código ASME lista las tensiones admisibles según los números SA (no confundir con los números A listados en el Código de tuberías de potencia). La Figura 9.3 de la página 306 lista las tensiones admisibles típicas para materiales de chapa de acero, ahora listado en la Sección II, parte D, en las tablas de tensiones admisibles. Nótese que los tubos que absorben calor, las chapas y calderines son diseñados por las ecuaciones y reglas de la Sección I.

Ejemplo de un problema de tubos para una caldera de tubos de agua. Un tubo de acero sin costura en una caldera de tubos de agua está fabricado con el material SA-210C y tiene $2^1/_4$″ (57,15 mm) de diámetro exterior y 0,188″ (4,7752 mm) de espesor, y absorbe calor a 650 °F (343,3 °C). El tubo ha sido expansionado en el calderín. ¿Cuál es la presión admisible para este tubo?

Solución. Utilizar la ecuación P con:

S = el valor para 700 °F (371 °C) según la Figura 9.2 es de 16.600 lbs/in^2 (1.172 kg/cm^2).
t = espesor del tubo = 0,188″ (4,7752 mm).
D = diámetro exterior del tubo = 2,25″ (57,15 mm).
$e = 0$ (porque el espesor del tubo es mayor que 0,12″ (3,048 mm)).

Sustituyendo en la ecuación del tubo,

$$P = 16.600 \left[\frac{2(0,188) - 0,01(2,25)}{2,25 - (0,188 - 0,005(2,25))} \right] = 16.600 \left[\frac{0,3535}{2,2323} \right] = 2.628,7 \text{ psi}$$

Ejemplo. ¿Qué espesor se requiere sobre tubos de 2″ (50,8 mm) de diámetro exterior fabricado por material SA-178A y que está situado en una zona de absorción térmica de una caldera de tubos de agua de 600 psi (42 kg/cm^2)? Los tubos están ensanchados en su alojamiento en el calderín.

Número de especificación	Composición	Forma	Resistencia final	Tensión admisible (kilopondios/pulgada²)*				
				De –20 a 650 °F (–6 a 343 °C)	700 °F (371 °C)	800 °F (426 °C)		
A. Tubos de acero al carbono								
SA 192	C-Si	Sin costura (sin soldadura)	47,0	18,8	11,5	9,0		
SA 178A	C	Soldado	47,0	11,8	11,5	7,7		
SA 226	C-Si	Soldado	47,0	11,8	11,5	7,7		
SA 210 A-1	C	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	14,4	10,8		
SA 178 C	C	Soldado	60,0	15,0	14,4	9,2		
SA 210 C	C-Mn	Sin costura (sin soldadura)	70,0	17,5	16,6	12,0		
B. Tubos de acero de baja aleación								
SA 209 T1b	C-1/2 Mo	Sin costura (sin soldadura)	53,0	13,3	13,2	13,1		
SA 250 T1b	C-1/2 Mo	Soldado	53,0	11,3	11,2	11,1		
SA 250 T1	C-1/2 Mo	Soldado	55,0	11,7	11,7	11,7		
SA 209 T1	C-1/2 Mo	Sin costura (sin soldadura)	55,0	13,8	13,8	13,7		
SA 213 T2	1/2 Cr-1/2 Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	14,4		
SA 423-1	3/4 C-1/2 Ni-Cu	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	—		
SA-213-T12	1 Cr-Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	14,8		
SA-213-T11	1 1/4 Cr-1/2 Mo-Si	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	15,0		
SA-213-T3b	2 Cr-1/2 Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	14,7		
SA-213-T22	2 1/4 Cr-1 Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	15,0		
				De –20 a 100 °F	300 °F	500 °F	700 °F	800 °F
SA 213-T21	3 Cr-1 Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	15,0	14,8	14,5
SA 213-T5	5 Cr-1/2 Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	15,0	13,4	12,8
SA 213-T7	7 Cr-1/2 Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	14,5	13,4	12,5
SA 213-T9	9 Cr-Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	14,5	13,4	12,8
C. Tubos de acero de alta aleación								
SA 268-TP405	12 Cr-1A1	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	13,3	12,9	12,1	—
SA 268-TP446	27 Cr	Sin costura (sin soldadura)	70,0	17,5	15,6	14,5	14,1	—
SA 213-TP304	18 Cr-8 Ni	Sin costura (sin soldadura)	75,0	18,8	16,6	15,9	15,9	15,2
SA 213-TP316	16 Cr-12 Ni & 2Mo	Sin costura (sin soldadura)	75,0	18,8	18,4	18,0	16,3	15,9
SA 213-TP321	18 Cr-10 Ni & Ti	Sin costura (sin soldadura)	75,0	18,8	17,3	17,1	15,8	15,5
SA 213-TP347	18 Cr-10 Ni & Cb	Sin costura (sin soldadura)	75,0	18,8	15,5	14,9	14,7	14,7

* *N. del T.*: Para pasar de kilopondios/pulgada² a kg/cm² hay que multiplicar por 645,16.

Figura 9.2. Tensiones admisibles típicas para el material de tubería según código ASME, Sección II, parte D. (*Cortesía de American Society of Mechanical Engineers.*)

Número de especificación	Designación	Tensión de rotura, kilopondios/pulgada²	Tensión admisible representativa no excediendo la temperatura del metal en °F	
			De –20 a 650 °F (de –6 a 343 °C)	800 °F (427 °C)
A. Chapa de acero al carbono				
SA 285A	Carbono, C	45,0	11,3	8,3
SA 285B	Carbono, C	50,0	12,5	9,0
SA 285C	Cabono, C	55,0	13,8	10,2
SA 442 Gr55	C-Mn-Si	55,0	13,8	10,2
SA 515 Gr55	C-Si	55,0	13,8	10,2
SA 516 Gr55	C-Si	55,0	13,8	10,2
SA 442 Gr60	C-Mn-Si	60,0	15,0	10,8
SA 516 Gr60	C-Si	60,0	15,0	10,8
SA 515 Gr60	C-Si	60,0	15,0	10,8
SA 515 Gr65	C-Si	65,0	16,3	11,4
SA 516 Gr65	C-Mn-Si	65,0	16,3	11,4
SA 515 Gr70	C-Si	70,0	17,5	12,0
SA 516 Gr70	C-Mn-Si	70,0	17,5	12,0
SA 299	C-Mn-Si	75,0	18,8	12,0
B. Chapa de acero de baja aleación				
SA 204A	C-1/2 Mo	65,0	16,3	16,2
SA 204B	C-1/2 Mo	70,0	17,5	17,5
SA 204C	C-1/2 Mo	75,0	18,8	18,8
SA 302A	Mn-1/2 Mo	75,0	18,8	17,7
SA 302B	Mn-1/2 Mo	80,0	20,0	18,8
SA 302C	Mn-1/2 Mo-1/2 Ni	80,0	20,0	18,8
SA 302D	Mn-1/2 Mo-3/4 Ni	80,0	20,0	18,8
SA 225A	Mn-V	70,0	17,5	14,8
SA 225B	Mn-V	75,0	18,8	12,0
SA 202A	1/2 Cr-1 1/4 Mn-Si	75,0	18,8	12,0
SA 202B	1/2 Cr-1 1/4 Mn-Si	85,0	21,3	12,0
SA 203A & D	2 1/2 Ni & 3 1/2 Ni	65,0	16,3	11,4
SA 203B & E	2 1/2 Ni & 3 1/2 Ni	70,0	17,5	12,0
SA 387 2C1.1	1/2 Cr-1/2 Mo	55,0	13,8	13,5
SA 387 12C1.1	1 Cr-1/2 Mo	55,0	13,8	13,8
SA 387 11C1.1	1 1/4 Cr-1/2 Mo-Si	60,0	15,0	14,8
SA 387 22C1.1	2 1/4 Cr-1 Mo	60,0	15,0	15,0
SA 387 21C1.1	3 Cr-1 Mo	60,0	15,0	13,9
SA 387-5	5 Cr-1/2 Mo	60,0	15,0	12,8
C. Chapa de acero de alta aleación				
			–20 a 100	300	500	700
SA 240-405	12 Cr-1A1	60,0	15,0	13,3	12,9	12,1
SA 240-304	18 Cr-8Ni	75,0	18,8	16,6	15,9	15,9
SA 240-316	16 Cr-12Ni-2 Mo	75,0	18,8	18,4	18,0	16,3
SA 240-321	18 Cr-10Ni-Ti	75,0	18,8	17,3	17,1	15,8
SA 240-347	18 Cr-10Ni-Cb	75,0	18,8	15,5	14,9	14,7

N. del T.: Para pasar de kilopondios/in² a kg/mm², hay que multiplicar por 645,16.

Figura 9.3. Tensiones admisibles típicas para los metales de chapa según el código ASME, Sección II, parte D. (*Cortesía de American Society of Mechanical Engineers.*)

Solución. Usando la ecuación:

$$t = \frac{PD}{2S + P} + 0{,}005D + e$$

donde: P = 600 psi (42 kg/cm²).

S = 11,500 lbs/in² de la Figura 9.2 a 700 °F.

$D = 2''$ (50,8 mm).
$e = 0$ (supuesto; si es preciso añadir 0,04 si el tubo está por debajo del espesor requerido por el Código para tubos expandidos).

Sustituyendo valores:

$$t = \frac{600(2)}{2(11.500) + 600} + 0{,}005(2) + 0 = 0{,}061'' = 1{,}55 \text{ mm}$$

Como este valor está por debajo del valor mínimo de la Tabla de la Figura 9.1 para 2" de diámetro (que marca 0,154") añadimos 0,04, con lo que:

$$t = 0{,}061 + 0{,}04 = 0{,}101'' = 2{,}57 \text{ mm}$$

PRESIÓN ADMISIBLE EN LOS TUBOS DE LAS CALDERAS PIROTUBULARES

Método antiguo: anterior a 1986. Para calderas de tubos de humos que utilizan el material común de tubos tipo SA-83 y SA-178A:

$$P = 14.000 \left(\frac{t - 0{,}065}{D} \right)$$

donde: P = máxima presión admisible, psi.
t = mínimo espesor requerido, in.
D = diámetro exterior del tubo, in.

Para calderas de tubos de cobre de especificación SB-75:

$$P = 12.000 \left(\frac{t - 0{,}039}{D} \right) - 250$$

Ejemplo. ¿Qué presión se permite sobre un tubo de acero de especificación SA-192 con los asientos finales del tubo expandidos y de 3" (76,2 mm) de diámetro, con espesor de pared de 0,115" (2,921 mm) y que va a utilizarse en una caldera pirotubular?

Solución.

$$P = \frac{14.000\,(0{,}115 - 0{,}065)}{3} = 4.667 \cdot (0{,}050) = 233 \text{ psi} = 16{,}3 \text{ kg/cm}^2$$

Método del nuevo Código. Es necesario utilizar los gráficos de presión exterior de la Sección II, parte D, del código ASME de calderas. Hay que obtener dos factores. El factor *A* se obtiene de una gráfica que se muestra en la Figura 9.4. Con el factor *A*, el factor *B* se obtiene de otra gráfica que está basada en el material utilizado con el límite elástico como criterio para cada curva. La Figura 9.5 es para acero al carbono y de baja aleación con un límite elástico mínimo de 24.000 psi (1.680 kg/cm^2) hasta 30.000 psi (2.100 kg/cm^2). El problema anterior se resuelve por el nuevo método como sigue a continuación.

El nuevo método requiere la utilización de la presión externa como fuerza actuando sobre el tubo en una cierta longitud, que para las calderas pirotubulares es desde la placa tubular hasta la otra placa tubular (distancia entre las dos placas de caldera). Para este ejemplo, suponemos que esta distancia es de 10 pies (3 metros). El primer paso, según el nuevo método ASME, es obtener los siguientes ratios o relaciones para el mismo tubo como se ha dado en el problema anterior:

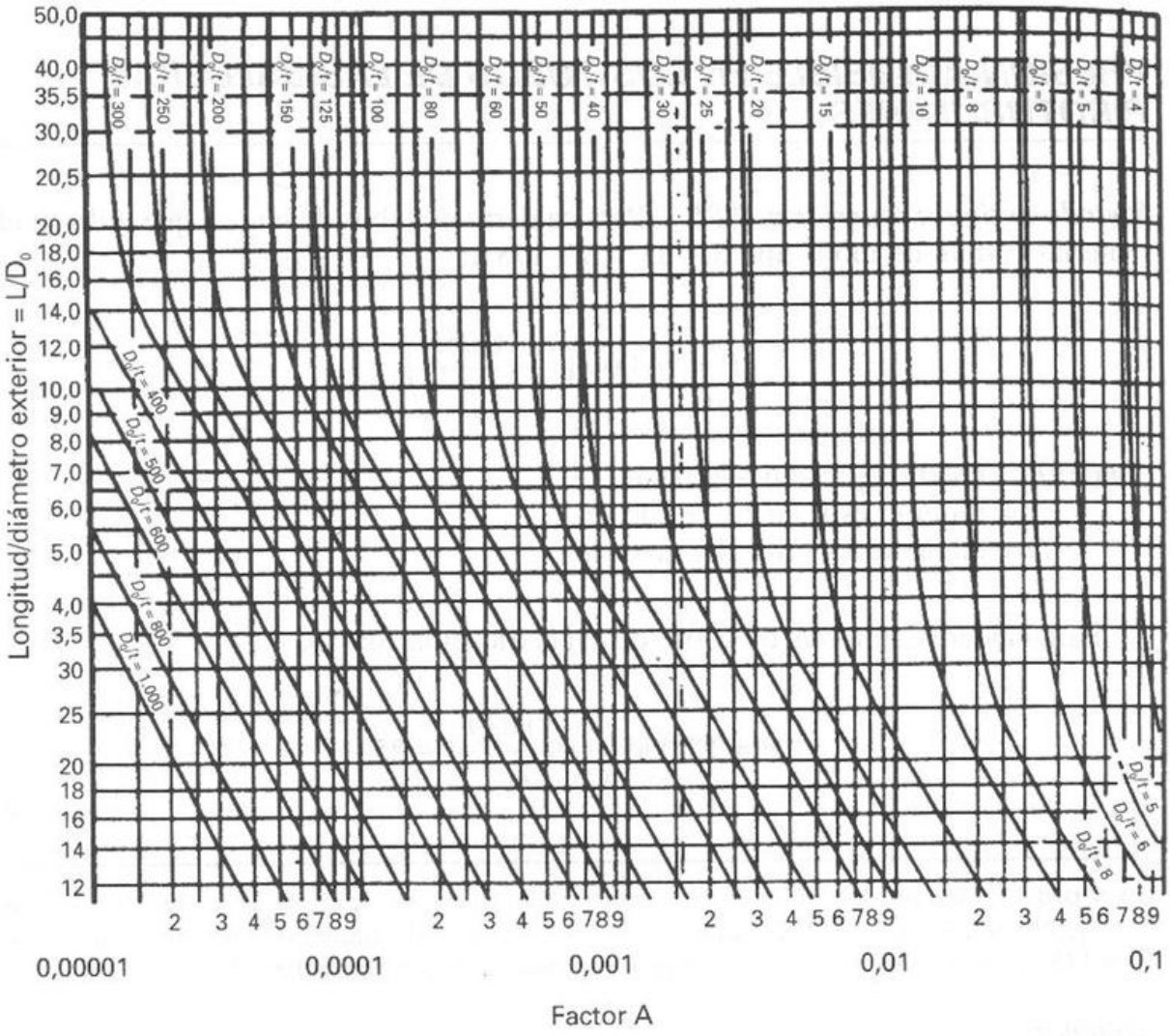


Figura 9.4. Gráfica del código ASME, Sección II, parte D, para determinar el Factor *A* al calcular la presión externa admisible para tubos de calderas pirotubulares, conductos y hornos. (*Cortesía de American Society of Mechanical Engineers.*)

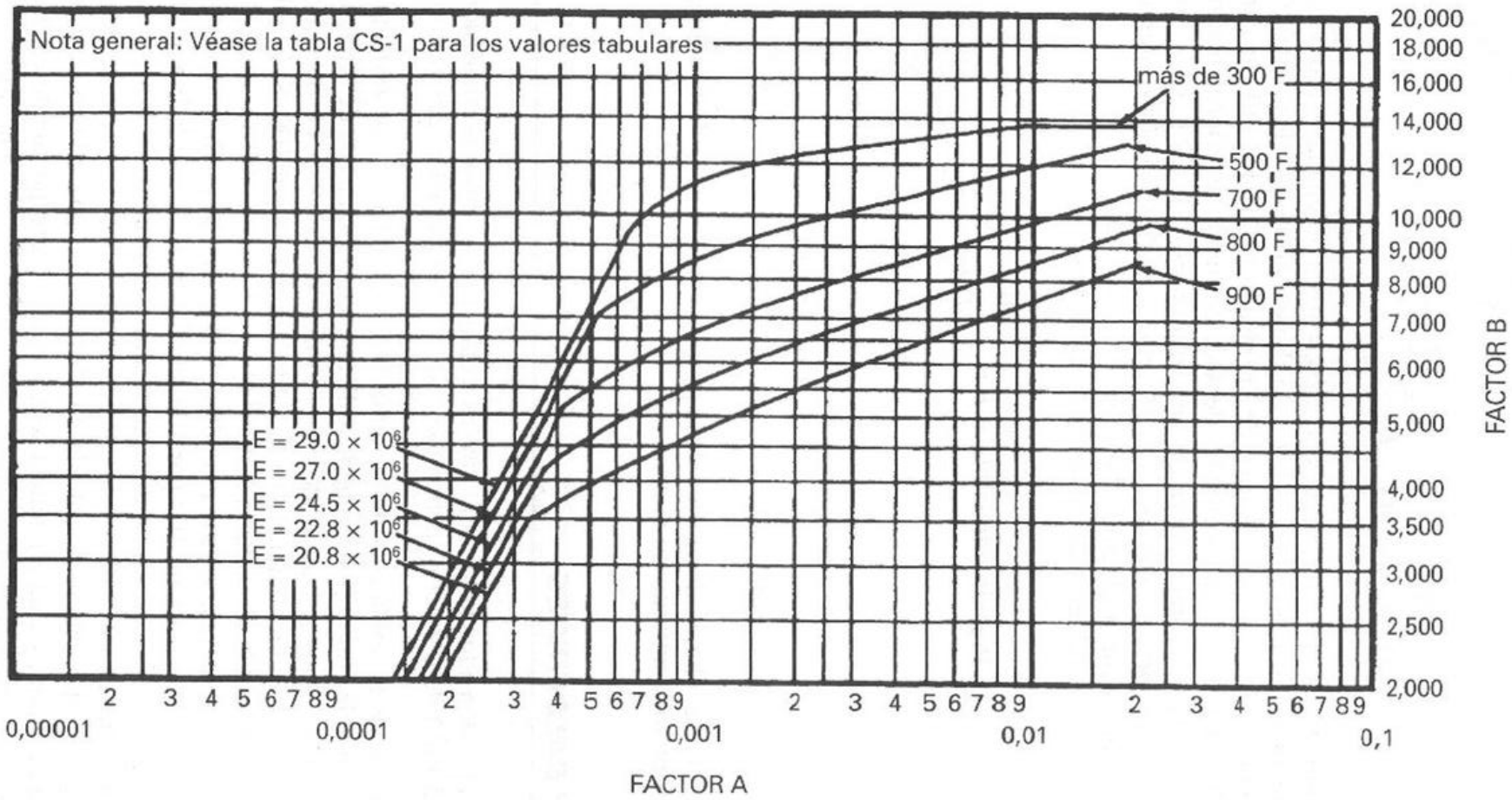


Figura 9.5. Gráfica del código ASME, Sección II, parte D, para determinar el factor B de los tubos para calderas y hornos pirotubulares, sometidos a presión exterior y construidos en aceros al carbono o aceros de baja aleación con límite elástico mínimo especificado de 24.000 psi (1,68 × 10^6 kg/cm^2) y máximo de 30.000 psi (2,1 × 10^6 kg/cm^2). (*Cortesía de American Society of Mechanical Engineers.*)

$$\frac{\text{Diámetro exterior}}{\text{Espesor}} = \frac{D_0}{t} = \frac{3}{0{,}115} = 26$$

$$\frac{\text{Longitud}}{\text{Diámetro exterior}} = \frac{L}{D_0} = \frac{10 \cdot 12}{3} = 40$$

Véase la Figura 9.4. Utilice los valores de $2/D_0 = 40$ en ordenadas y moviéndose horizontalmente en la línea llega hasta $D_0/t = 26$. Baje a abscisas y lea $A = 0{,}0012$.

Véase la Figura 9.5. Ésta es la gráfica de la presión exterior a utilizar para el material SA-178A del tubo. Usando el valor de A determinado anteriormente, muévase verticalmente hasta la línea curva de temperatura 700 °F (371 °C) y en esa curva (en ese punto de intersección del valor A con la curva), vaya horizontalmente hasta la ordenada de la curva obtenido así el factor $B = 7.400$.

El código ASME de calderas da la siguiente ecuación para este caso:

$$\text{Presión admisible} = P = \frac{4B}{3 \cdot D_0/t}$$

y sustituyendo:

$$P = \frac{4 \cdot 7.400}{3 \cdot 26} = 379{,}5 \text{ psi} = 26{,}5 \text{ kg/cm}^2$$

Como puede verse, el método gráfico de la presión exterior considera la longitud del tubo, que el método antiguo no considera.

VIROLAS Y CALDERINES

Para calcular la presión admisible sobre virolas o calderines y tubos normalizados de más de 5″ (125 mm) de diámetro, deben tomarse en consideración dos factores:

1. Eficiencia de la soldadura de la junta longitudinal. Si una soldadura de unión se nivela con la chapa, puede utilizarse un 100 por 100 de eficiencia o rendimiento, lo que se ha exigido por el Código desde 1986. De otra manera, hay que utilizar una eficiencia de la soldadura del 90 por 100. Si la caldera era de construcción remachada (roblonada), se tenía que utilizar una eficiencia de unión apropiada (véase el código ASME de 1971). Si la virola es del tipo sin costura, se usa un 100 por 100 de eficiencia (véase la Figura 9.6*a*).
2. Como las calderas de tubos de agua están construidas de forma que los calderines tienen los orificios de entrada de los tubos, el efecto de debilitamiento que ello origina se calcula en términos de una eficiencia o rendimiento de unión, y esta eficiencia se usa con el correspondiente espesor de la virola para obtener una presión de trabajo admisible para la virola o calderín en la zona de los orificios de los tubos.

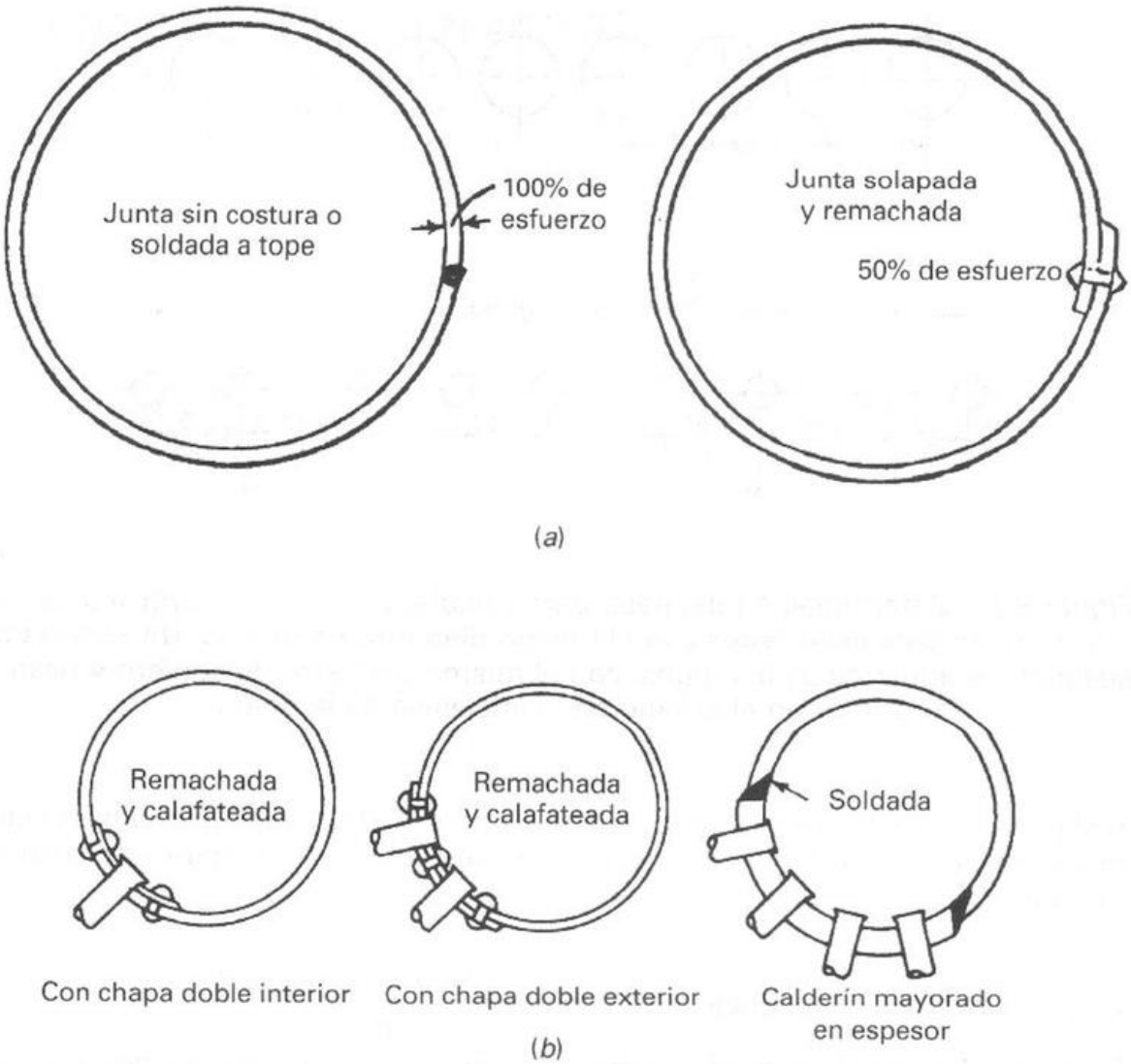


Figura 9.6. La eficiencia o rendimiento de calderines y juntas de virola se determina por el tipo de construcción. (*a*) La virola sin costura o soldada a tope tiene un 100 por 100 de eficiencia comparada con una junta antigua remachada y solapada. (*b*) Las juntas de unión de los calderines o virolas se construyen de mayor espesor para contrarrestar el debilitamiento producido por los orificios de los tubos. Las viejas calderas reblonadas utilizan doble chapa como se ve en el dibujo. Los calderines soldados tienen una sección fina o delgada y una sección de mayor espesor del calderín y ambas están unidas por soldadura.

La eficiencia de una unión se halla como sigue: cuando el paso entre agujeros (taladros) es igual (Fig. 9.7*a* de la página siguiente):

$$\text{Eficiencia} = \frac{p - d}{p}$$

donde: p = paso o distancia longitudinal entre agujeros, pulgadas o mm.
d = diámetro del agujero, pulgadas o mm.

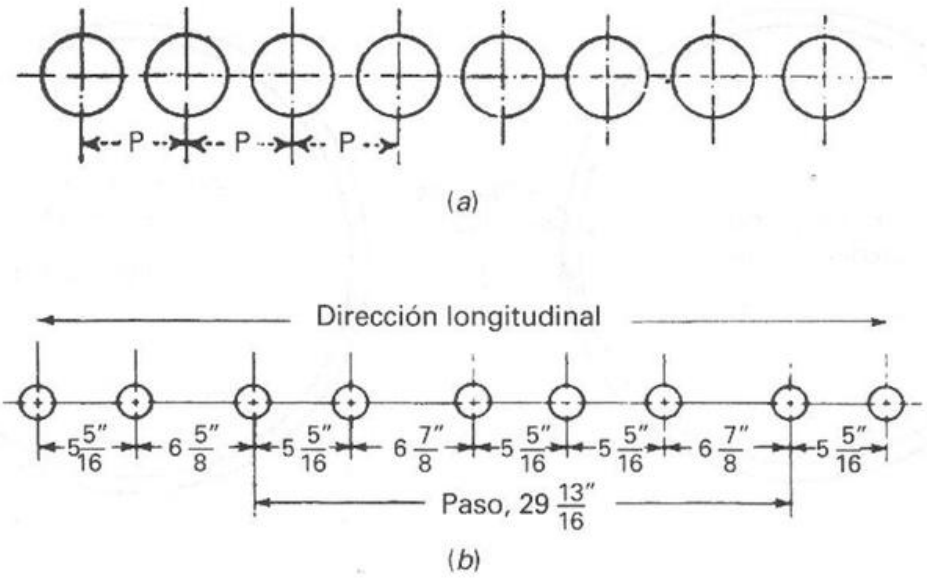


Figura 9.7. Determinación del paso para calcular la unión. (*a*) Orificios de los tubos igualmente espaciados con el mismo diámetro de orificio. (*b*) Espaciado desigual de agujeros de los tubos, con el mismo diámetro de agujero y paso a utilizar en el cálculo de la eficiencia de la unión.

Si el paso de los agujeros o taladros es desigual (Fig. 9.7*b*), deberá seleccionarse una unidad longitudinal de longitud en la que estén incluidos todos los pasos desiguales. Así pues:

$$\text{Eficiencia de la unión} = \frac{p - nd}{p}$$

donde: p = longitud o paso seleccionado para incluir todas las variaciones de paso, pulgadas o mm.
d = diámetro de los taladros o agujeros, pulgadas o mm.
n = número de taladros en la longitud seleccionada.

El código ASME, Sección I, proporciona métodos para hallar la eficiencia de uniones diagonales por medio de gráficos.

La eficiencia de las uniones usuales de tubos es bastante baja, normalmente del 35 por 100 al 50 por 100. En tiempos pasados, en la práctica de calderas roblonadas, a menudo, la resistencia de la unión se reforzaba con una chapa o doble espesor sobre la sección de unión de los taladros. Los agujeros o taladros estaban en toda la sección; así, aunque la eficiencia de la unión no se aumentaba porque el espaciado del tubo permanecía inalterado, el espesor sí se aumentaba (véase la Figura 9.6*b*).

Como ilustra la Figura 9.7*b*, otro método para aumentar la resistencia de la unión es hacer el calderín en dos mitades longitudinales con los extremos longitudinales soldados y la zona de los taladros de mayor espesor. Las zonas de espesor desigual son mecanizadas normalmente en la zona de mayor espesor con un fresado de 3 a 1 para igualar el espesor de la chapa más delgada antes de la soldadura. Esto se hace para evitar la concentración de tensiones en la junta o unión.

CÁLCULO DE LA PRESIÓN ADMISIBLE

1. Para calderas antiguas, véase el código ASME de 1971. La ecuación siguiente se utilizó para calcular la presión admisible de virolas o calderines:

$$P = \frac{0{,}8SEt}{R + 0{,}6t} \quad \text{o} \quad t = \frac{PR}{0{,}8SE - 0{,}6P}$$

2. Para construcción soldada o sin costura, con el refuerzo de soldadura eliminado sustancialmente y la chapa de refuerzo también eliminada, utilice la ecuación de la Sección I:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(y - C)} \quad \text{o} \quad t = \frac{PR}{SE - (1 - y)P} + C$$

donde:

P = presión máxima admisible, en psi o kg/cm^2.
S = máxima tensión admisible para la temperatura de trabajo del metal, lbs/in^2 o kg/cm^2.
t = mínimo espesor necesario, pulgadas o cm.
R = radio interior del cilindro o virola, pulgadas o cm.
E = eficiencia de la unión. (E = eficiencia de las juntas longitudinales soldadas o de las uniones entre taladros, la que sea menor. $E = 1$ para cilindros sin costuras, y $E = 1$ para juntas soldadas, supuesto que todo el refuerzo sobre las juntas longitudinales está eliminado y nivelada la soldadura con la chapa. Para viejas calderas soldadas $E = 0{,}9$ si la unión no está repasada uniformemente. E = eficiencia para juntas remachadas. E = eficiencia para uniones entre taladros.)
C = factor dependiente de si el tubo o virola está taladrado (para calderines o virolas $C = 0$; véase el Código para otras especificaciones).
y = factor que depende de si el acero es férrico o austenítico según se especifique a continuación:

Temperatura	Valores de y	
	Acero férrico	Acero austenítico
Menor de 900 °F (480 °C)	0,4	0,4
950 °F (510 °C)	0,5	0,4
1.000 °F (538 °C)	0,7	0,4
1.050 °F (566 °C)	0,7	0,4
1.100 °F (593 °C)	0,7	0,5
1.150 °F (621 °C)	0,7	0,7

Ejemplo 1. Problema de una caldera antigua roblonada. Una caldera remachada tiene 66″ (1,676 metros) de diámetro y 16 pies (4,80 metros) de longitud. La chapa de la virola es de 7/16″ (11,11 mm) de espesor, la tensión admisible es de 13.750 lb/in^2 (962,5 kg/cm^2) y la presión admisible es de 125 psi (8,75 kg/cm^2). ¿Cuál es la eficiencia mínima admisible circunferencial de la junta periférica?

Solución. Utilizando la fórmula:

$$P = \frac{0{,}8\ SET}{R + 0{,}6t}$$

sustituyendo valores:

$$125 = \frac{0{,}8(13.750)E\,(0{,}4375)}{33 + 0{,}6(0{,}4375)}$$

y despejando:

$$E = \frac{125(33{,}2625)}{11.000(0{,}4375)} = 0{,}864\ (86{,}4\,\%)$$

$$\text{Eficiencia circunferencial} = \frac{86{,}4\,\%}{2} = 43{,}2\,\%$$

La resistencia circunferencial de la virola debe ser siempre al menos la mitad que la de la junta o unión longitudinal. Esto se ilustró en el Capítulo 8.

Ejemplo 2. Virola de espesor desigual a causa de problemas de unión. ¿Cuál es la máxima presión de trabajo admisible en un calderín soldado que tiene una chapa de 1,469″ (37,31 mm) de espesor y 2,406″ (61,11 mm) de espesor de la chapa tubular? El diámetro exterior de la virola es de 57,75″ (1.454,15 mm). El diámetro exterior de la chapa tubular es de 58,688″ (1.490,68 mm). El material es un acero al carbono tipo SA-515-70 y la temperatura del metal no es mayor de 650 °F (343 °C). La eficiencia de la unión es de 0,429 y la eficiencia de la junta soldada es del 100 por 100. Le tensión admisible para este acero ferrítico es de 17.500 lbs/in^2 (1.225 kg/cm^2). Los cálculos para la presión admisible deben hacerse por duplicado, como sigue.

Solución. Basándose en la unión por soldadura, en el espesor de la chapa y en el radio interior de la virola o chapa tubular:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(t - C)}$$

$$R = \frac{D}{2} - t = \frac{57{,}75''}{2} - 1{,}469 = 27{,}406''$$

$$y = 0{,}4 \qquad \text{y} \qquad C = 0$$

Así pues:

$$P = \frac{17.500 \times 1 \times (1{,}469)}{27{,}406 + (1 - 0{,}4) \times (1{,}469)} = 908 \text{ psi } (63{,}62 \text{ kg/cm}^2)$$

Basándose en el espesor de la chapa tubular y eficiencia de la unión:

$$R = \frac{58{,}688}{2} - 2{,}406 = 26{,}938''$$

Utilizando la misma ecuación:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(t - C)}$$

$$P = \frac{17.500 \times 0{,}429 \times 2{,}406}{26{,}938 + (1 - 0{,}4) \times 2{,}046} = 636{,}44 \text{ psi } (44{,}55 \text{ kg/cm}^2)$$

La presión más baja domina, la presión admisible es 636,44 psi (44,55 kg/cm^2).

Ejemplo 3. Problema de eficiencia de la unión y presión admisible de virola. El calderín de lodos de una caldera de tubos de agua tiene un espesor de chapa de 5/8″ (15,9 mm) con un diámetro exterior de 43,25″ (1.098,6 mm) y tiene taladros para tubos de 3 $^{9}/_{32}$″ (83,341 mm) de diámetro separados horizontalmente con un paso de 5 $^{5}/_{16}$″ (134,93 mm) en grupos de tres (Fig. 9.7*b*) y dos tubos con 6 $^{7}/_{8}$″ (174,63 mm) entre grupos. El espesor de la chapa es de 1/2″ (12,7 mm). Los tubos y la chapa del calderín están soldados según exige el código ASME. El material para ambos es acero SA-285C con temperaturas máximas por debajo de 650 °F (343 °C) ¿Cuál es la máxima presión admisible para este calderín si el diámetro interior es de 43,125″ (1.095,375 mm)?

Solución. Utilizando la ecuación:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(t - C)}$$

donde: S = 13.800 lbs/in^2 (966 kg/cm^2), obtenido de la Figura 9.3.
E = 1 o la eficiencia calculada de la soldadura de unión.
C = 0.
y = 0,4.

Basándose en la virola de:

$$R = \frac{43{,}125}{2} - 0{,}5 = 21{,}0625'' \text{ (534,988 mm) con } t = 0{,}5''$$

Sustituyendo en la ecuación principal de P:

$$P = \frac{13.800(0,5 - 0)}{21,0625 + (1 - 0,4)(0,5 - 0)} = 323 \text{ psi } (22,6 \text{ kg/cm}^2)$$

Basándose en la chapa tubular (es necesario calcular primero la eficiencia de la unión):

$$E = \frac{p - nd}{p} = \frac{29,8125 - 5(3,28125)}{29,8125} = 0,449$$

$$R = \frac{43,25}{2} - \frac{5}{8} = 21'' \text{ (533,4 mm)}$$

Sustituyendo en la ecuación de P:

$$P = \frac{13.800(0,449)(0,625 - 0)}{21 + (1 - 0,4)(0,625 - 0)} = 181,17 \text{ psi } (12,7 \text{ kg/cm}^2)$$

y ésta es la presión admisible.

Virolas de chapa de gran espesor. Las virolas de gran espesor se definen en la Sección I como aquéllas cuyo espesor de chapa de virola excede del 50 por 100 del radio interior; bajo estas condiciones se utiliza la siguiente ecuación para calcular la presión admisible de la virola o colector:

$$P = SE\left[\frac{Z - 1}{Z + 1}\right]$$

donde: S = tensión admisible.
P = presión máxima admisible.
E = eficiencia de la unión o junta longitudinal o eficiencia de la soldadura.

$$Z = \frac{(SE + P)}{(SE - P)} = \left[\frac{(R + t)}{R}\right]^2 = \left[\frac{R_0}{R}\right]^2$$

donde: t = mínimo espesor de la chapa de la virola, pulgadas o cm.
R = radio interior de la zona más débil (o delgada) de la virola, pulgadas o cm.
R_0 = radio exterior de la zona más débil o delgada de la virola, pulgadas o cm.

Ejemplo de cálculo de presión admisible de una virola de gran espesor. Un colector cilíndrico de una caldera de tubos de agua está hecho de acero SA-204B y trabaja a 650 °F (340 °C). El diámetro exterior es de 12″ (305 mm) y de 3″ (76,2 mm) de espesor. Calcular la presión admisible.

Solución. De la tabla de características de los aceros (Fig. 9.3) se ve que para el acero SA-204B, la tensión S = 17.500 lbs/in^2 (1.225 kg/cm^2).

$$R = \frac{12 - (2 \cdot 3)}{2} = 3''$$

El espesor de 3″ excede del 150 por 100 del radio (1,5″)

$$E = 1 \text{ (junta soldada)}$$

$$Z = \left[\frac{R}{R_0}\right]^2 = \left[\frac{6}{3}\right]^2 = 4$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$P = 17.500(1)\left[\frac{4 - 1}{4 + 1}\right] = 10.500 \text{ psi } (735 \text{ kg/cm}^2)$$

Fondos curvados

Los fondos de calderín de la mayoría de las calderas de tubos de agua convencionales están cerrados con un fondo curvado esférico o elipsoidal. Cuanto más corto sea el radio de curvatura, esto es, cuanto menor sea la distancia o aproximación a la forma semiesférica de radio reducido, tanto mayor será la resistencia a la presión interior. Consecuentemente, el código ASME especifica que el radio no será mayor que el diámetro de la virola o calderín al cual está soldado, de otro modo el fondo requiere refuerzo o nervadura.

Hay cuatro tipos de fondos huecos no arriostrados permitidos por el Código: *segmento esférico*, *semielipsoidal*, *hemisférico* y *fondo plano*. Los tres primeros son fondos bombeados (Fig. 9.8*a* de la página siguiente). En la Figura 9.8*b* se ven algunos fondos planos y sistemas de refuerzo. Los fondos bombeados están prolongados en su extrema circunferencia con una prolongación cilíndrica para soldar a la virola y con un radio de esquina angular en el lado cóncavo del fondo de no menos que tres veces el espesor del fondo y en ningún caso menor del 6 por 100 del diámetro de la virola a la cual se van a soldar los fondos.

Las aberturas de paso de hombre en los fondos bombeados deben tener una pestaña o reborde de no menos de tres veces el espesor requerido del fondo para chapa de hasta 1 $^1/_2$″ (38 mm) de espesor. Si es de mayor espesor, el espesor del reborde debe ser el espesor de la chapa más 3″ (76,2 mm). La mínima anchura de la superficie de cierre para una junta de agujero de hombre debe ser 11/16″ (17,5 mm) y los espesores de las juntas cuando están apretadas y comprimidas deben ser menores de 1/4″ (6,4 mm).

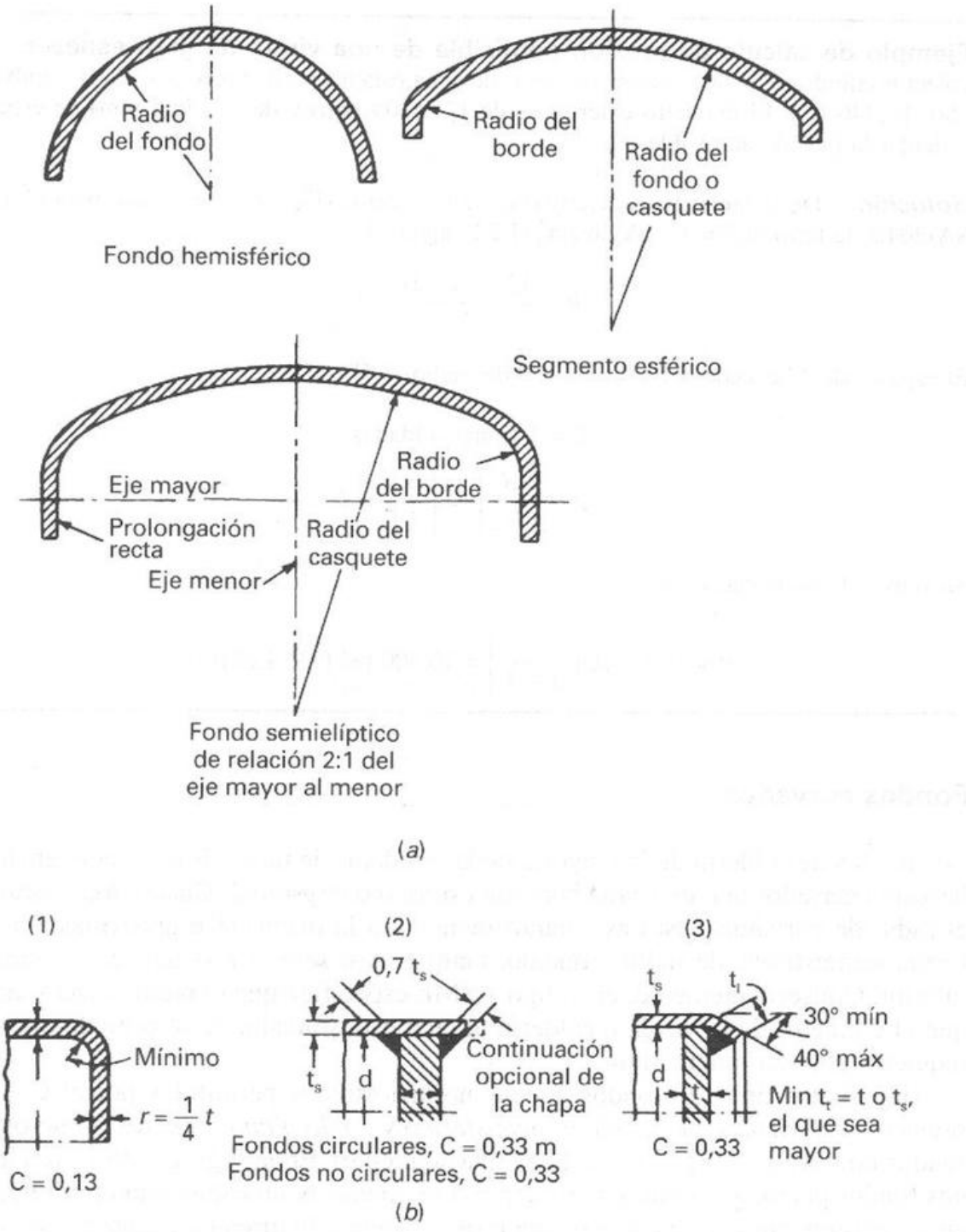


Figura 9.8. Fondos curvos y planos. (*a*) Tres tipos de fondos curvos: semiesférico, segmento o casquete esférico y semiesférico. (*b*) Métodos aceptables según el Código de soldar fondos planos que determinan el factor *C* en la ecuación de los fondos planos.

Los fondos curvados se calculan para la presión admisible según los siguientes métodos, dependiendo del tubo de fondo y de si tiene o no agujero de hombre. Para *segmentos esféricos sin manguito*, utilice la fórmula:

$$t = \frac{5PL}{4{,}8S}$$

donde: S = máxima tensión admisible, lbs/in^2 o kg/cm^2. (Sección II, parte D.)
t = espesor del fondo, pulgadas o cm.
P = máxima presión admisible, psi o kg/cm^2.
L = radio del lado cóncavo con el cual el fondo está curvado, pulgadas o cm.

Para *fondos semielípticos* (semielipsoidales) con presión por el lado cóncavo (sin agujero de hombre), utilice la fórmula de la chapa para virolas, pero suponga que la chapa es sin costura (no hay eficiencia de unión). Para *fondos semiesféricos* sin agujero de hombre y presión en el lado cóncavo, utilice la siguiente expresión:

$$t = \frac{PL}{1{,}6S} \tag{9.1}$$

o

$$t = \frac{PL}{2S - 0{,}2P} \tag{9.2}$$

donde t = espesor requerido, pulgadas o cm.
P = presión máxima admisible, psi o kg/cm^2.
S = tensión máxima admisible, lb/in^2 o kg/cm^2.
L = radio con el cual se ha construido el fondo, pulgadas o cm.

La ecuación 9.2 puede utilizarse para fondos de más de 1/2″ (12,7 mm) de espesor con virolas o calderines de más de 5″ (125 mm) de diámetro y que están integralmente agregados a calderines sin costura o que están unidos por soldadura de fusión sin arriostramientos.

Si el espesor requerido del fondo en la ecuación anterior excede del 35,6 por 100 del radio interior, debe utilizarse la fórmula siguiente para el espesor del fondo:

$$t = L(Y^{1/3} - 1)$$

donde:

$$Y = \frac{2(S + P)}{2(S - P)}$$

Fondos curvos con agujeros de hombre. Cuando uno de los fondos —segmento de esfera, semielíptico o hemisférico— tiene un agujero de hombre embridado o una abertura de acceso que excede de 6″ (153 mm) en cualquier dimensión, se tiene en cuenta de la siguiente manera:

1. Por la fórmula para el segmento de fondo esférico.
2. Debe incrementarse el espesor del fondo en un 15 por 100, pero en ningún caso menos de 1/8″ (3,2 mm) sobre el espesor obtenido por la fórmula.
3. Si el radio al cual se curva el fondo es menor del 80 por 100 del diámetro de la virola, el espesor del fondo con abertura de hombre embridada debe hallarse (o calcularse) haciendo el radio de la curva igual al 80 por 100 del diámetro de la virola.

Ejemplo de cálculos de fondo curvado. Un fondo curvado semielipsoidal de 42″ (1.067 mm) de diámetro tiene un agujero de hombre embridado, es de 7/8″ (22,2 mm) de espesor, tiene un radio de curvatura de 84″ (2.134 mm) con la presión actuando sobre el lado cóncavo. El material es un acero SA-285C. ¿Cuál es la presión admisible para este fondo?

Solución. A causa del agujero de hombre embridado, la ecuación del segmento esférico debe utilizarse para calcular la presión admisible. Despejando esta ecuación para P:

$$P = \frac{4{,}8St}{5L}$$

con:

$S = 13.800$ lbs/in^2 = 966 kg/cm^2 (de la Sección II, parte D).
$t = 0{,}875'' - 0{,}131'' = 0{,}744''$ (el espesor debe reducirse en un 15 por 100: $0{,}875 \times 0{,}15 = 0{,}131$ ó 0,125, lo que sea mayor).

Para fondos semielipsoidales el Código exige usar un radio de fondo igual al 80 por 100 del diámetro de la virola, o:

$$L = 0{,}8\,(42) = 33{,}6''$$

Y sustituyendo valores en P:

$$P = \frac{4{,}8\,(13.800)\,(0{,}744'')}{5\,(33{,}6)} = 293{,}35 \text{ psi } (20{,}5 \text{ kg/cm}^2)$$

Ejemplo. Un fondo semiesférico de 54″ (1.372 mm) de diámetro interior está soldado a la virola del calderín de una caldera de tubos de agua con presión en el lado cóncavo. La soldadura cumple los requisitos del Código. El material del fondo es un acero SA-387 grado 2 con tensión admisible de 13.800 Lbs/in^2 (966 kg/cm^2). La caldera ha estado trabajando a 750 psi (52,5 kg/cm^2) y 600 °F (316 °C) de sobrecalentamiento. ¿Cuál debería ser el espesor del fondo sin agujero y con agujero de hombre?

Solución. *Sin agujero de hombre*:

$$t = \frac{PL}{2S - 0{,}2P}$$

con:

$$P = 750 \text{ psi}$$

$$S = 13.800 \text{ lbs/in}^2$$

$$L = 27''$$

Sustituyendo:

$$t = \frac{750(27)}{2(13.800) - 0{,}2(750)} = 0{,}738'' \ (18{,}73 \text{ mm})$$

Con agujero de hombre:

Se requiere $t = \dfrac{5PL}{4{,}8S}$ más $0{,}15t$ o $0{,}125''$, lo que sea mayor.

Sustituyendo como antes:

$$t = \frac{5(750)(27)}{4{,}8(13.800)} = 1{,}53''$$

Se requiere $t = 1{,}53 + 0{,}15(1{,}53) = 1{,}76''$ (44,7 mm)

Cálculo del radio de curvatura con los datos de bombeo y cuerda de segmentos. Véase la Figura 9.9*a* de la página siguiente. En el triángulo ABO:

R = hipotenusa del triángulo rectángulo

$$R^2 = \left(\frac{C}{2}\right)^2 + (R - b)^2$$

Despejando y operando:

$$R^2 = \frac{C^2}{4} + R^2 + b^2 - 2Rb$$

$$R = \frac{C^2}{8b} + \frac{b}{2}$$

Ejemplo. Cuerda $C = 38''$ (965,2 mm) en un fondo con un bombeo $B = 4''$ (102 mm). Por tanto:

$$R = \frac{(38)^2}{8(4)} + \frac{4}{2} = 47{,}13'' \ (1.197 \text{ mm})$$

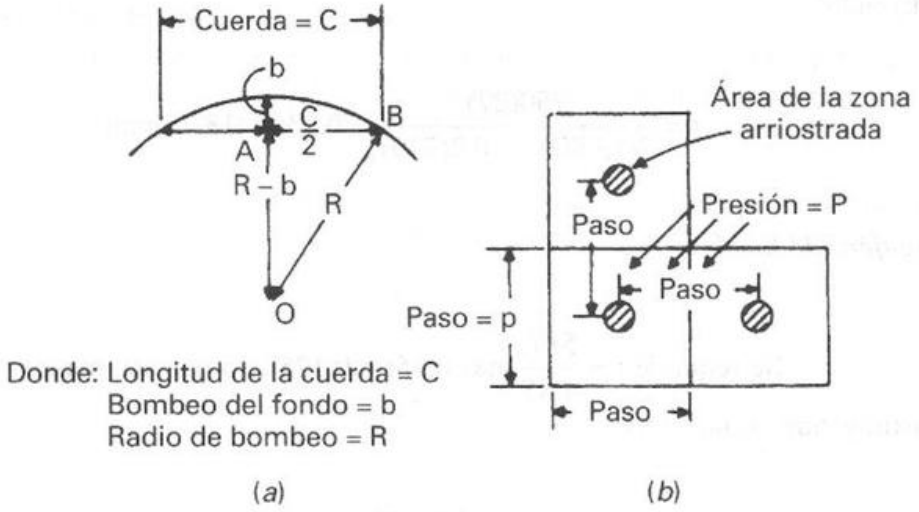


Figura 9.9. (*a*) El radio de bombeo puede calcularse mediante la longitud de la cuerda *C* y la flecha *b*. (*b*) Una riostra debe contrarrestar la fuerza creada por la presión actuante sobre el área limitada por la dimensión del paso.

Fondos planos

El código ASME tiene varias ecuaciones para fondos planos, dependiendo de si el fondo es circular, rectangular o cuadrado. Para un fondo típico circular, la ecuación usada es:

$$t = d\sqrt{\frac{CP}{S}}$$

donde: t = mínimo espesor requerido, pulgadas o cm.
d = diámetro, medido según indica el Código.
C = un factor, dependiente del método de unión (Fig. 9.8*b*).
S = valor de la tensión máxima admisible, lbs/in^2 o kg/cm^2.
P = valor de la presión máxima admisible, psi o kg/cm^2.
t_r = espesor requerido para la virola a la cual se une el fondo, pulgadas o cm.
t_s = espesor actual para la virola a la cual se une el fondo, pulgadas o cm.
m = relación de t_r/t_s.

(Consúltese PG- 31 de la Sección I y la Figura PG- 31 para modos de unión permitidos por el Código.)

Ejemplo. Un fondo plano no arriostrado está unido por soldadura a la virola como se muestra en la Figura 9.8*b*(2) y con tratamiento térmico posterior cumpliendo los requerimientos del Código. El fondo plano es circular de un diámetro de 16″ (406 mm) y 1 $^1/_2$″ (38 mm) de espesor. La virola sin costura a la cual está soldado el fondo es de un espesor de 3/8″

(9,53 mm) y los cálculos indican que sólo se requiere un espesor de 5/16″ (7,94 mm ≃ 8 mm) para la virola. ¿Cuál es la presión admisible para el fondo plano?

Solución. Debe usarse la ecuación del fondo plano con los valores de: $S = 13.800$ lb/in^2; $d = 16''$; $t = 1{,}5''$; $m = t_r/t_s = 5/16''/3/8'' = 0{,}3125/0{,}375 = 0{,}8333$; y de la Figura 9.8*b*(2) obtenemos $C = 0{,}33$ m $= 0{,}33\ (0{,}833) = 0{,}275$. Con ello, sustituyendo en:

$$t = d\sqrt{\frac{CP}{S}}$$

obtenemos:

$$1{,}5 = 16\sqrt{\frac{0{,}275P}{13.800}}$$

$$P = \frac{13.800}{0.275}\left[\frac{1{,}5}{16}\right]^2 = 441 \text{ psi } (30{,}9 \text{ kg/cm}^2)$$

Para *fondos planos no circulares* se introduce un factor Z en la ecuación del fondo plano circular:

$$Z = 3{,}4 - \frac{2{,}4d}{D}$$

donde: d = lado corto.
D = lado largo.

Ejemplo. Si el fondo anterior fuera rectangular con unas dimensiones de 10″ × 16″ (254 × 406 mm) y las demás condiciones fuesen las mismas, excepto que $C = 0{,}33$. ¿Cuál sería la presión admisible sobre este fondo plano rectangular?

Solución. Con $d = 10''$ como lado menor del rectángulo, con $S = 13.800$ lbs/in^2. Para fondos no circulares:

$$t = d\sqrt{\frac{ZCP}{S}}$$

$$C = 0{,}33$$

$$Z = 3{,}4 - \frac{2{,}4(10)}{16} = 1{,}9$$

Sustituyendo y resolviendo P:

$$1{,}5 = 10\sqrt{\frac{1{,}9(0{,}33)P}{13.800}}$$

$$\sqrt{\frac{1{,}5}{10}} = \frac{1{,}9(0{,}33)P}{13.800}$$

$$P = \frac{13.800}{1{,}9(0{,}33)}\left[\frac{1{,}5}{10}\right]^2 = 495{,}2 \text{ psi } (34{,}66 \text{ kg/cm}^2)$$

REFUERZO Y ARRIOSTRAMIENTO (ATIRANTADO)

El primer punto a recordar en todos los problemas que tienen que ver con el reforzamiento o arriostrado es que la tensión de una riostra o tirante es debida a la presión actuante (en psi o kg/cm^2) sobre el área de chapa soportada por el tirante o riostra. Esta *presión total* está resistida por la resistencia interna del refuerzo (tensión unitaria) multiplicada por el área o sección neta del refuerzo. Estos hechos son la base de todas las fórmulas de los refuerzos.

Las riostras, tirantes y virotillas se usan en las calderas para reforzar la chapa plana u otra superficie expuesta a la carga de la presión, ya que las superficies planas deberían tener el espesor suficiente para resistir estas cargas si no se usasen las riostras o tirantes.

Para calcular y resolver problemas de arriostramiento con tirantes y virotillos, es necesario establecer los requisitos del Código que establecen que el área requerida de una riostra (tirante o virotillo) en su mínima sección de corte debe hallarse por cálculo de la carga sobre dicha riostra, dividiendo ésta por su tensión admisible sobre el tirante o riostra e incrementando el área o sección resultante por un factor de 1,1 (10 por 100) (véanse las Figuras 9.9*b* y 9.10 de la página siguiente). Puede desarrollarse en forma de ecuación, del modo siguiente, para usarla en problemas de tirantes/riostras:

$$\frac{\text{Carga sobre riostra}}{\text{Tensión admisible}} = \text{Área resistente de la riostra}$$

Estableciendo que:

S = tensión admisible, lb/in^2 o kg/cm^2.
a = área de la riostra o tirante (normalmente circular), pulgadas^2 o cm^2.
p = paso del espaciado de las riostras o tirantes, pulgadas o cm.
P = presión de trabajo admisible, psi o kg/cm^2.

Así pues:

$$\frac{(p^2 - a)P}{S} = \frac{a - (\text{área del orificio})}{1{,}1}$$

Adicionalmente al tirante o la riostra, la resistencia de la chapa entre tirantes debe ser la adecuada o la chapa se abombará entre los tirantes o riostras. El Código requiere que se compruebe esto mediante una de las siguientes ecuaciones:

$$t = p\sqrt{\frac{P}{CS}} \qquad \text{o} \qquad P = \frac{St^2C}{p^2}$$

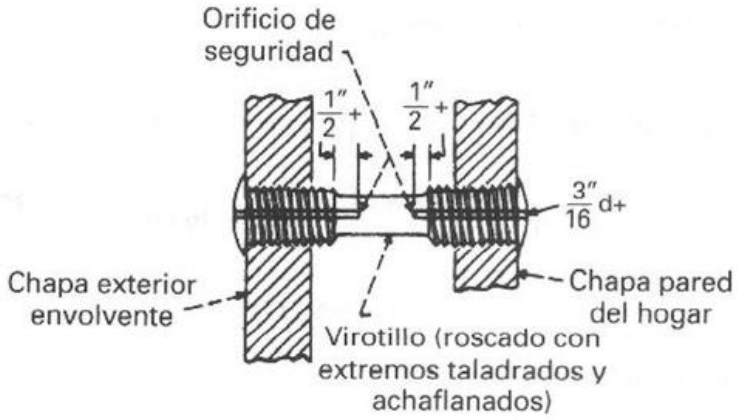


Figura 9.10. Tirante o virotillo taladrado de arriostramiento que lleva un taladro central que se prolonga 1/2″ más allá de la rosca por ambos extremos, constituyendo un elemento de seguridad.

donde: S = máxima tensión admisible, lb/in^2 o kg/cm^2.
t = espesor requerido de la chapa, pulgadas o cm.
p = paso máximo, pulgadas o cm.
P = presión admisible máxima, psi o kg/cm^2.
C = factor dependiente del tipo de construcción.

Por ejemplo, C = 2,1 para riostras soldadas o atornilladas en chapas de no más de 7/16″ (11,1 mm) de espesor, con los extremos remachados sobre ellas, y C = 2,2 si la chapa es de más de 7/16″ (11,1 mm) de espesor.

La Sección I del código ASME lista otros valores de C e ilustra acerca del paso a utilizar en la construcción soldada en ángulo, ilustrada en la Figura A-8 de la Sección I. El paso es, generalmente, de tirante a tirante o del punto de tangencia en superficies curvas al primer tirante, como se ilustra en la Sección I.

Ejemplo de problema sobre arriostrado. Cuestión (*a*): ¿Cuál es el máximo paso al cuadrado admisible de los tirantes o riostras en la chapa plana del hogar de una caldera con caja de fuegos, si las chapas están soportadas por tirantes roscados o riostras de 7/8″ (22,2 mm) con orificios de seguridad de 3/16″ (4,76 mm) en los extremos como se ve en la Figura 9.10? Los tirantes o riostras tienen 12 roscas en V por pulgada y la presión es de 115 psi (8 kg/cm^2). El material de los tirantes o riostras es acero SA-675 con una tensión admisible de 12.500 lbs/in^2 (875 kg/cm^2), mientras que el material de la chapa es SA-299 con una tensión admisible de 18.800 lb/in^2 (1.316 kg/cm^2) para trabajo a 650 °F (343 °C).

Cuestión (*b*): ¿Cuál es el mínimo espesor de chapa requerido entre las riostras?

Solución. Utilice esta ecuación para la cuestión (*a*):

$$(p^2 - a)P = \left(\frac{a - 0{,}0276}{1{,}1}\right)S$$

donde: a = 0,4190 in^2 (área de la sección de un tornillo de 7/8″ roscado). El área del orificio de seguridad de 3/16″ es de 0,0276 in^2.
P = 115 psi.
S = 12.500 lb/in^2

Sustituyendo y resolviendo para el paso p:

$$(p^2 - 0{,}419)115 = \left(\frac{0{,}419 - 0{,}0276}{1{,}1}\right)12.500 = 4.447{,}73$$

$$p^2 = \frac{0{,}419 + 4.447{,}73}{115} = 39{,}09$$

$$p = 6{,}25'' \ (158{,}8 \text{ mm})$$

Para la cuestión (b), use:

$$t = p\sqrt{\frac{P}{CS}}$$

donde: $p = 6{,}25''$
$P = 115$ psi
$C = 2{,}1$ (suponiendo que la chapa es menor de 7/16″)
$S = 18.800$ lb/in^2

Sustituyendo y resolviendo para t:

$$t = 6{,}25\sqrt{\frac{115}{(2{,}1(18.800)}} = 0{,}337'' \ (8{,}57 \text{ mm})$$

Las riostras deben utilizarse para atirantar las chapas interiores del hogar a la exterior o chapa envolvente (Fig. 9.10). El tamaño y el paso del tirante tiene mucho que ver con la presión máxima admisible de la caldera.

Es de notar en la Figura 9.10 que los finales están torneados ligeramente de forma que el área del tornillo en la raíz de la rosca no sea menor que la del cuerpo central. Sin embargo, algunos tirantes roscados están fabricados sin aguzar los finales; así, al calcular el área neta se utilizará el diámetro de la raíz de la rosca.

Los finales afilados de los tirantes roscados deberían ser tratados térmicamente para reducir cualquier tendencia a la fragilidad. La longitud del tirante atornillado debe ser tal que al menos dos roscas sobresalgan de las chapas. Las extremidades están remachadas sobre las chapas.

Las riostras o tirantes se rompen a veces a consecuencia de la dilatación y contracción de la chapa del hogar; el punto de rotura está normalmente cerca de la superficie interior de la chapa. Los orificios —chivato (de seguridad)— de los tirantes deben ser de no más de 8″ (200 mm) de longitud, ya que estos tirantes son considerados como menos flexibles y más susceptibles de roturas que los tirantes más largos. El orificio «chivato» es al menos de 3/16″ (4,76 mm) de diámetro y está taladrado desde fuera hasta una profundidad de al menos 1/2″ (12,7 mm) más allá de la superficie interior de la chapa o, si el tirante es con reducción central de diámetro, hasta al menos 1/2″ más allá de esta reducción. Es obvio que cuando el tirante rompe a medio camino en su sección recta, la fuga a través del orificio «chivato» daría la alarma.

Riostras diagonales. Para arriostrar las partes planas de los colectores que no están soportados por los tubos, se usan riostras en diagonal por encima de los tubos. Este arriostramiento no es tan directo como el del tirante longitudinal y también atiranta las chapas. Pero el tirante diagonal deja más sitio encima de los tubos para inspección, reparación y limpieza. Una forma común de riostra diagonal se muestra en la Figura 9.11 de la página siguiente, ahora soldada en los puntos de anclaje según el Código*. Para calcular la resistencia de una riostra diagonal, hay que tener en consideración todo lo siguiente según el Código:

1. ¿Cuál es el sesgo o inclinación de la diagonal o su ángulo con la superficie plana que arriostra?
2. ¿Está soldada o remachada a la virola y colector?
3. ¿Cómo es la construcción en los extremos de la riostra donde se abrocha a la virola o colector: remachada o soldada, con pernos o pasadores, pletinas u hojas (tipo pata de gallo)? Véanse las Figuras 9.11*a*(2) y *a*(3).

El Código permite que las riostras diagonales o «tirantes de esquina» puedan calcularse como riostras rectas similares al método de la riostra atirantada. Este método hace apelación a la multiplicación de la presión por el área de un lado o término, con la tensión de sujeción de la riostra en el otro lado o término de la ecuación. Por ejemplo, en la Figura 9.11*a*(1), si la relación de L/l es 1,15 o menos (en una caldera pirotubular horizontal), el cuerpo de la riostra se calcula como tirante recto. Pero la tensión admisible a utilizar es del 90 por 100 de la permitida para un tirante recto. Si L/l es mayor de 1,15, el cuerpo del tirante se calcula incrementando el área requerida del tirante por L/l. En forma de ecuación, esto se expresa como sigue:

$$A = \frac{aL}{l}$$

donde: a = área de la sección recta del cuerpo de la riostra.
A = área de la sección diagonal del cuerpo de la riostra.
l = longitud de los ángulos recto y normal al área a arriostrar [véase la Figura 9.11*a*(1)].
L = longitud de la riostra diagonal.

Las reglas del Código sobre pletinas o «palmas» que estén remachadas al final de las riostras diagonales requeridas exigen que la sección recta de esta parte de la riostra sea al menos 25 por 100 mayor que la del cuerpo principal de la riostra.

Ejemplo. El área neta de un segmento a arriostrar es de 504 in^2 y está soportada por siete riostras diagonales de 1 $^1/_4$" de diámetro (1,227 in^2 de área neta). La longitud de estas diagonales es menor que 1,15 veces la longitud de un tirante directo y no excede de 120 diámetros. Se usa el acero SA-285C para construcción soldada según el Código. ¿Qué presión es permisible en el segmento arriostrado?

---

* *N. del T.:* En España, estos detalles de los «tirantes de esquina» y cartelas soldadas se pueden ver en las Figuras 25 y 26, páginas 73 y 74, respectivamente, de la Norma UNE 9-300-90/3.

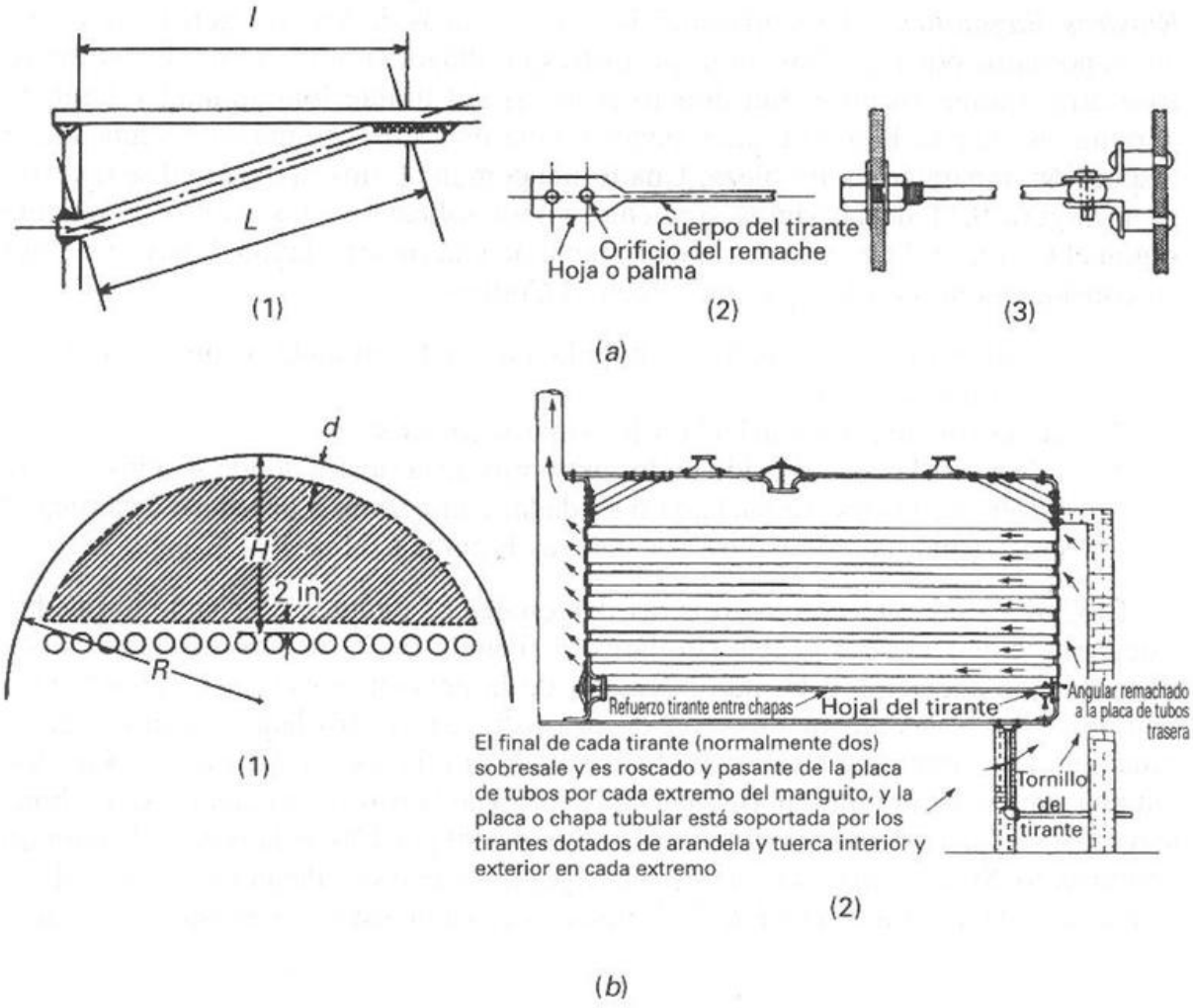


Figura 9.11. (*a*) Tipos de riostras usadas en calderas de tubos de humos para reforzar superficies planas: (1) tirante diagonal, (2) tirante con plentina y (3) riostra pasante. (*b*) Las superficies planas por encima de los tubos de 2″ de diámetro desde la línea tangencial de tubos requieren arriostramiento, usualmente por riostras diagonales como se muestra, mientras que las superficies planas por debajo de los tubos están arriostradas con riostras longitudinales en toda la longitud entre las placas.

Solución. El material SA-285C grado C (tabla de la Figura 9.3) tiene una tensión admisible de 13.800 lb/in^2. Todas las temperaturas están por debajo de 400 °F (204 °C).

$$AP = 0{,}9(7aS)$$

a = área de una riostra = 1,227 in^2

A = área a arriostrar = 504 in^2

Sustituyendo en la ecuación y resolviendo para P:

$$P = \frac{(0{,}9)(7)(1{,}227)(13.900)}{504} = 213{,}2 \text{ psi } (14{,}92 \text{ kg/cm}^2)$$

Ejemplo. El área a arriostrar en la chapa frontal tubular de una caldera es de 136 in^2. Si se refuerza con dos riostras diagonales del tipo soldado, ¿qué diámetro de riostra se requeriría para soportar con seguridad 165 psi, $L = 29\ ^1/_4''$; $l = 28\ ^5/_8''$. El material es SA-285C para riostras por debajo de 600 °F (315 °C). La tensión admisible es de 13.800 lbs/in^2 (966 kg/cm^2).

Solución.

$$\frac{L}{l} = \frac{29{,}25}{28{,}625} = 1{,}02,$$ menos que 1,15, puede calcularse como tirante recto.

Utilizando:

$$AP = 0{,}9\ naS$$

donde: $A = 136\ in^2$
$n = 2$ riostras
$P = 165$ psi
$S = 13.800$ lbs/in^2

Sustituyendo y resolviendo para a:

$$136(165) = 0{,}9(2)13.800(a)$$

$$a = \frac{136(165)}{1{,}8(13.800)} = \frac{22.440}{24.840} = 0{,}903\ in^2$$

De ese modo, riostras de $1\ ^1/_8''$ deberán utilizarse, ya que:

$$\frac{\pi D^2}{4} = 0{,}903\ in^2$$

y resolviendo, $D = 1{,}1''$. El tamaño más próximo es $1\ ^1/_8''$ (28,58 mm).

Áreas de las placas tubulares a arriostrar. El Código tiene dos ecuaciones para determinar el área a arriostrar en las superficies planas, o sea las áreas o zonas sin agujeros tubulares denominadas segmentos.

Segmentos de una virola embridada. El área a arriostrar está separada 2" (50,8 mm) de los tubos y a una distancia d de la virola como se muestra en la Figura 9.11*b*(1). La distancia d es la más grande de las siguientes:

d = el radio exterior de la brida, pero sin exceder 8 veces el espesor de la virola, o

$$d = 80\frac{t}{\sqrt{P}}$$

donde: d = distancia no arriostrada desde la virola, pulgadas o cm.
t = espesor de la virola, pulgadas o cm.
p = presión de trabajo máxima admisible, psi o kg/cm^2.

El área neta A a arriostrar para una virola embridada es pues:

$$A = \frac{4(H - d - 2)^2}{3} \sqrt{\frac{2(R - d)}{(H - d - 2)} - 0{,}608}$$

donde: A = Área a arriostrar, in^2 o cm^2.
H = distancia desde los tubos hasta la virola, pulgadas o cm.
d = diámetro exterior de la brida, pulgadas o cm. Para virolas no embridadas, $d = 0$.
R = radio o diámetro de la virola, pulgadas o cm.

Ejemplo. (*a*) Una caldera de 66″ (167,64 cm) de tubos de humos está trabajando a 140 psi (9,8 kg/cm^2) de presión. Las placas embridadas frontales son de 9/16″ (14,3 mm) de espesor. La distancia desde los tubos superiores a la virola es de 24″ (609,6 mm) y d = 3″ (7,62 cm) [Fig. 9.11*b*(1)]. ¿Cuál es el área a arriostrar?

(*b*) La placa frontal incumple los requisitos del Código de la soldadura. Si esta placa se va a arriostrar mediante riostras diagonales de 1 $^1/_4$ (32 mm) de diámetro. ¿Cuántas riostras se precisarán si L no excede de l más de 1,15 veces y se admite una tensión de 9.500 lbs/in^2 (665 kg/cm^2) en la sección normal de la riostra?

Solución. (*a*)

$$A = \frac{4(24 - 3 - 2)^2}{3} \sqrt{\frac{2(33 - 3)}{24 - 3 - 2} - 0{,}608} = 768{,}6 \text{ in}^2 = 0{,}495587 \text{ m}^2$$

(*b*)

$$PA = 768{,}6 \; P = 0{,}9 \; naS$$

donde: n = número de riostras
a = área de cada riostra en in^2: $\pi \times {}^2/4 = \pi \times 1{,}25^2/4 = 1{,}2272 \text{ in}^2 = 7{,}91 \text{ cm}^2$
S = tensión admisible, lb/in^2 o kg/cm^2
P = presión admisible, psi o kg/cm^2

Dando valores:

$$768{,}6(140) = 0{,}9(1{,}2272)9.500n$$

$$n = 10{,}26$$

Así que se colocarán 11 riostras.

Ejemplo. ¿Cuál sería el área a arriostrar según los datos del problema anterior si la placa frontal no fuese embridada?

Solución. Utilice la misma ecuación siguiente pero con $d = 0$:

$$A = \frac{4(H - d - 2)^2}{3}\sqrt{\frac{2(R - d)}{(H - d - 2)}} - 0{,}608$$

$$A = \frac{4(24 - 2)^2}{3}\sqrt{\frac{2(33)}{24 - 2}} - 0{,}608 = 998 \text{ in}^2 = 0{,}64387 \text{ cm}^2$$

En las antiguas calderas de hogar interior, el segmento de las chapas tubulares por encima de la fila superior de tubos requería arriostramiento. Para esto, había tres métodos comunes. En una caldera de este tipo que no excediera de 36″ (914 mm) de diámetro o 100 psi (7 kg/cm^2) de presión de trabajo, se remachaban angulares de acero de otras formas estructurales como úes de acero a la chapa del segmento. Estas formas estructurales salientes eran de dimensiones proporcionadas para tener suficiente resistencia a la flexión para aguantar la carga de presión.

Para calderas que excedan de 36″ (914 mm) de diámetro o de 100 psi (7 kg/cm^2) de presión de trabajo, el segmento plano de las placas tubulares requiere arriostramiento bien mediante riostras diagonales entre la chapa tubular y la virola o por medio de riostras que atirantan ambas placas a través de toda la longitud de la caldera (entre placas) [Fig. 9.11*b*(2)]. Estas últimas son normalmente preferibles, porque dejan más espacio dentro de la caldera para limpieza e inspección. Las riostras longitudinales pueden hacer bastante difícil para un operario o inspector moverse cerca de los tubos de humos en el interior de la caldera.

Había tres tipos generales de riostras diagonales para conexión mediante remaches: el Houston, el MacGregor y el Sunlly. Es importante mantener todos ellos bajo tensión.

Las riostras diagonales son situadas en posición antes de que los tubos sean instalados en la caldera. Para evitar la distorsión de la placa frontal por la tensión de las riostras, se colocan o grapan una o más barras fuertes de acero entre las chapas tubulares frontales como unas vigas, con lo que las chapas tubulares se mantienen en posición venciendo o soportado la tensión de las riostras hasta que se instalen algunos de los tubos de humos. Estas vigas se conocen como «contrafuertes».

Las modernas riostras diagonales se sueldan como se muestra en la Figura 9.11*a*(1).

El arriostrado de la sección de placa tubular por debajo de los tubos de humos de las calderas de hogar interior y similares está afectado por las riostras longitudinales. Estas riostras están conectadas, roscadas en su extremo anterior y articuladas sobre la placa trasera según se ve en las Figuras 9.11*a*(3) y 9.11*b*(2). Los finales frontales de estas riostras longitudinales inferiores —normalmente en número de dos— pasan a través de la placa tubular frontal con tuercas y arandelas exteriores e interiores. Se hacen estancos a las fugas por medio de empaquetaduras metálicas blandas o anilladuras de varios tipos bajo las tuercas y arandelas.

La razón de porqué los finales traseros de las riostras longitudinales no pasan a través de la placa tubular trasera sino que se articulan interiormente a dicha placa es para que el fuego o calor a elevada temperatura no dañe la tuerca y roscados finales.

Si se ha provisto de un agujero de hombre embridado por debajo de los tubos en la placa frontal o chapa delantera de caldera, el efecto del arriostrado de la brida es

suficiente para permitir una deducción de 100 pulgadas^2 (645 cm^2) en el área frontal arriostrada (placa frontal). Sin embargo, si se utilizan riostras longitudinales a través del colector o virola total, esto será obligatorio hacerlo (a no ser que se pongan riostras diagonales entre la parte superior de la chapa frontal de amarre de tubos y la virola y, así, estas pequeñas riostras diagonales sí serían suficientes para reforzar el segmento frontal) y así no habría deducción por embridado del área a reforzar en la chapa tubular delantera.

La Figura 9.12*a* ilustra la superficie neta a arriostrar cuando la distribución y colocación de tubos es irregular. Las zonas adyacentes a los hogares cilíndricos, como se ve en la Figura 9.12*b*, pueden no necesitar arriostrado en tanto en cuanto la distancia sea igual o menor de 1 $^1/_2$ veces el paso, siempre que el paso esté calculado por la ecuación de la riostra roscada y se utilice el valor de C recomendado para dicha ecuación.

Vigas y riostras radiales. El tirante de arriostramiento (Fig. 9.13*a*) fue muy utilizado antiguamente para soportar las chapas de la bóveda del hogar de las locomotoras. Pero ha sido ampliamente reemplazado para este objetivo por la riostra radial (Fig. 9.13*b*). Todavía es utilizado para soportar las partes superiores de las cámaras de combustión de la caldera escocesa marina. El virotillo o tirante consta de una viga de fundición tubular con sus extremos apoyados sobre las chapas del hogar o caja de fuegos. Soporta la chapa bóveda cuasi-plana (la parte superior de la cámara de combustión) por medio de tornillos o espárragos roscados.

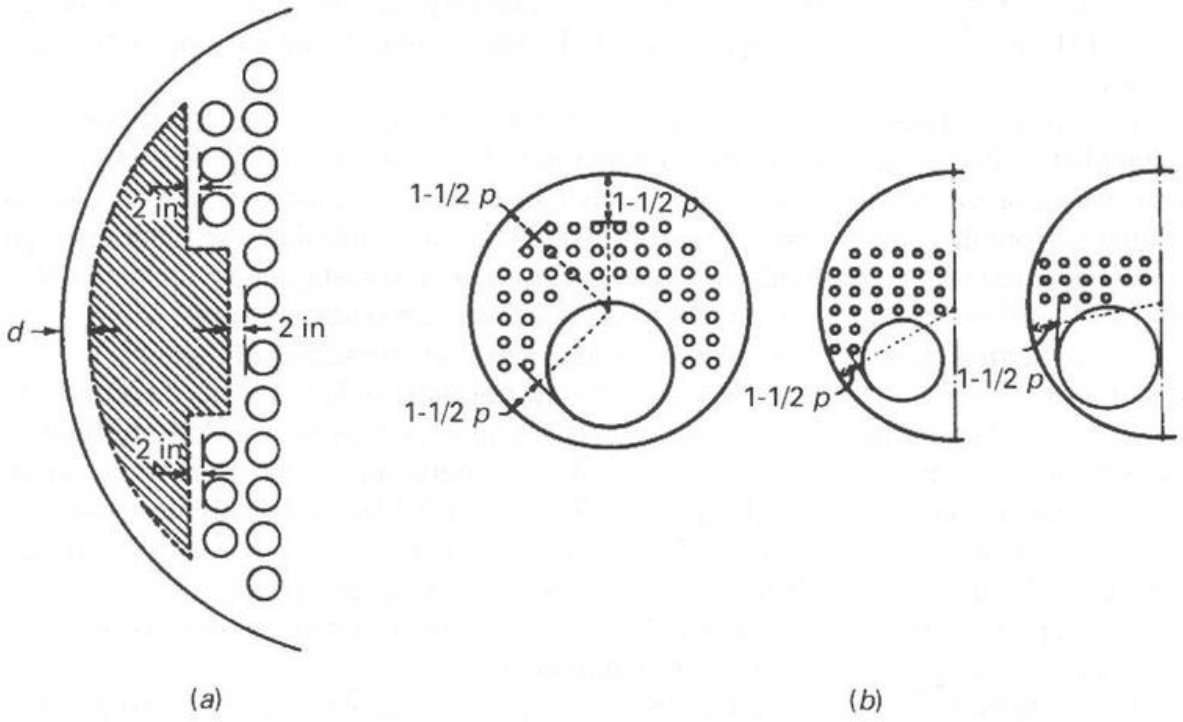


Figura 9.12. (*a*) Área a arriostrar cuando el modelo de disposición tubular es irregular. (*b*) Las zonas adyacentes a los hogares cilíndricos pueden diseñarse por la ecuación del tensor roscado con un paso máximo permitido como el señalado en la figura.

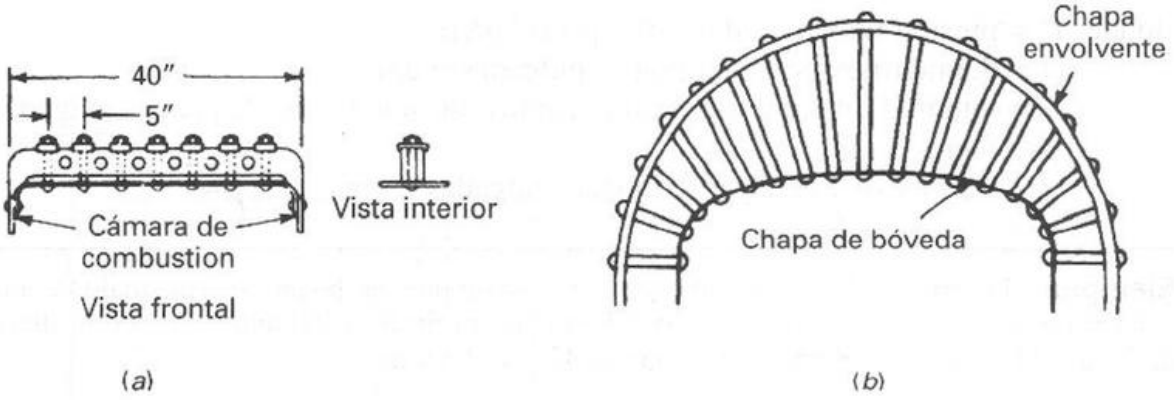


Figura 9.13. (*a*) Un tirante viga o virotillo se utiliza para soportar la bóveda de la caja de fuego (hogar) de locomotoras y calderas escocesas del hogar interior (marinas). (*b*) Tirantes radiales.

Los tirantes radiales son más flexibles y tienden a acumular menos recubrimientos (o depósitos) de circulación que los virotillos. Casi la única ventaja de los tirantes viga o virotillos es que pasan rectos a través de las chapas mejor que en ángulo como los tirantes radiales. El código ASME de calderas tiene ejemplos sobre el uso de ecuaciones especiales para los virotillos.

ARRIOSTRADO DEL HOGAR CONTRA SU COLAPSO

Las chapas del hogar de una caldera y de otras partes internas de calderas deben resistir la presión sobre las superficies externas que tienden a producir el colapso (reventón). Esta tendencia al colapso se resiste mediante el arriostramiento del hogar o arriostrando la virola con tirantes y virotillos.

Un hogar que no sobrepase los 38″ (965 mm) de diámetro exterior puede ser autosoportante, y la utilización de riostras puede eliminarse supuesto que el espesor del hogar es suficiente para rigidizar y que la luz del hogar no es demasiado grande.

Método anterior a 1986. El código ASME de calderas proporciona las dos fórmulas siguientes para hogares circulares autosoportantes, no arriostrados y de no más de 4,5 diámetros de longitud de hogar. Cuando la longitud no excede de 120 veces el espesor de la chapa utilice:

$$P = \frac{51{,}5(300t - 1{,}03L)}{D} \tag{9.3}$$

Cuando la longitud excede de 120 veces el espesor de la chapa, utilice la ecuación siguiente:

$$P = \frac{1{,}09(10^6)(t^2)}{LD} \tag{9.4}$$

donde: P = presión máxima admisible, psi o kg/cm^2.
D = diámetro exterior del hogar, pulgadas o cm.
L = longitud total del hogar entre centros de soldaduras de placas, pulgadas o cm.
t = espesor de la chapa del hogar, pulgadas o cm.

Ejemplo. Determinar la presión admisible de trabajo para un hogar no arriostrado de una caldera pirotubular siendo el diámetro exterior del hogar de 26″ (660 mm), espesor de chapa de 7/16″ (11,11 mm) y longitud del hogar de 42″ (1.066,8 mm).

Solución.

$$130 \times 0{,}4375 = 52{,}38$$

Se aplica la Ecuación 9.3 (longitud menor de $120t$):

$$P = \frac{51{,}5(300t - 1{,}03L)}{D}$$

donde: $t = 0{,}4375''$
$L = 42''$
$D = 26''$

$$P = \frac{51{,}5[300(0{,}4375) - 1{,}03(42)]}{26} = \frac{51{,}5(87{,}99)}{26} = 174{,}3 \text{ psi } (12{,}2 \text{ kg/cm}^2)$$

Método posterior a 1986. Este método necesita utilizar diagramas de presión externa para determinar la presión admisible, algo parecido al método de los tubos de humos visto anteriormente.

Usando los mismos datos que en el ejemplo anterior y refiriéndonos a la Figura 9.4:

Longitud del hogar, $L = 42''$ (1.066,8 mm).
Diámetro exterior del hogar, $D_0 = 26''$ (660,4 mm).
Espesor de chapa del hogar, $t = 0{,}4375''$.

El material del hogar es acero SA-210C con un límite elástico de 40.000 lbs/in^2 (2.800 kg/cm^2). Deben obtenerse las siguientes relaciones o ratios para obtener el factor A de la Figura 9.4:

$$\frac{L}{D} = \frac{42}{26} = 1{,}62 \quad ; \quad \frac{D_0}{t} = \frac{26}{0{,}4375} = 59{,}4$$

Refiriéndonos a la Figura 9.4 y utilizando estos ratios, se obtiene el factor $A = 0{,}00124$. Con este factor conocido y refiriéndonos ahora a la Figura 9.14 para hallar el factor B una temperatura de material mínima de 700 °F (371 °C), resulta un factor $B = 9.000$ de la derecha del gráfico. El código ASME proporciona la siguiente ecuación para la presión de trabajo admisible:

$$\text{Presión admisible } p = \frac{4B}{3D_0/t}$$

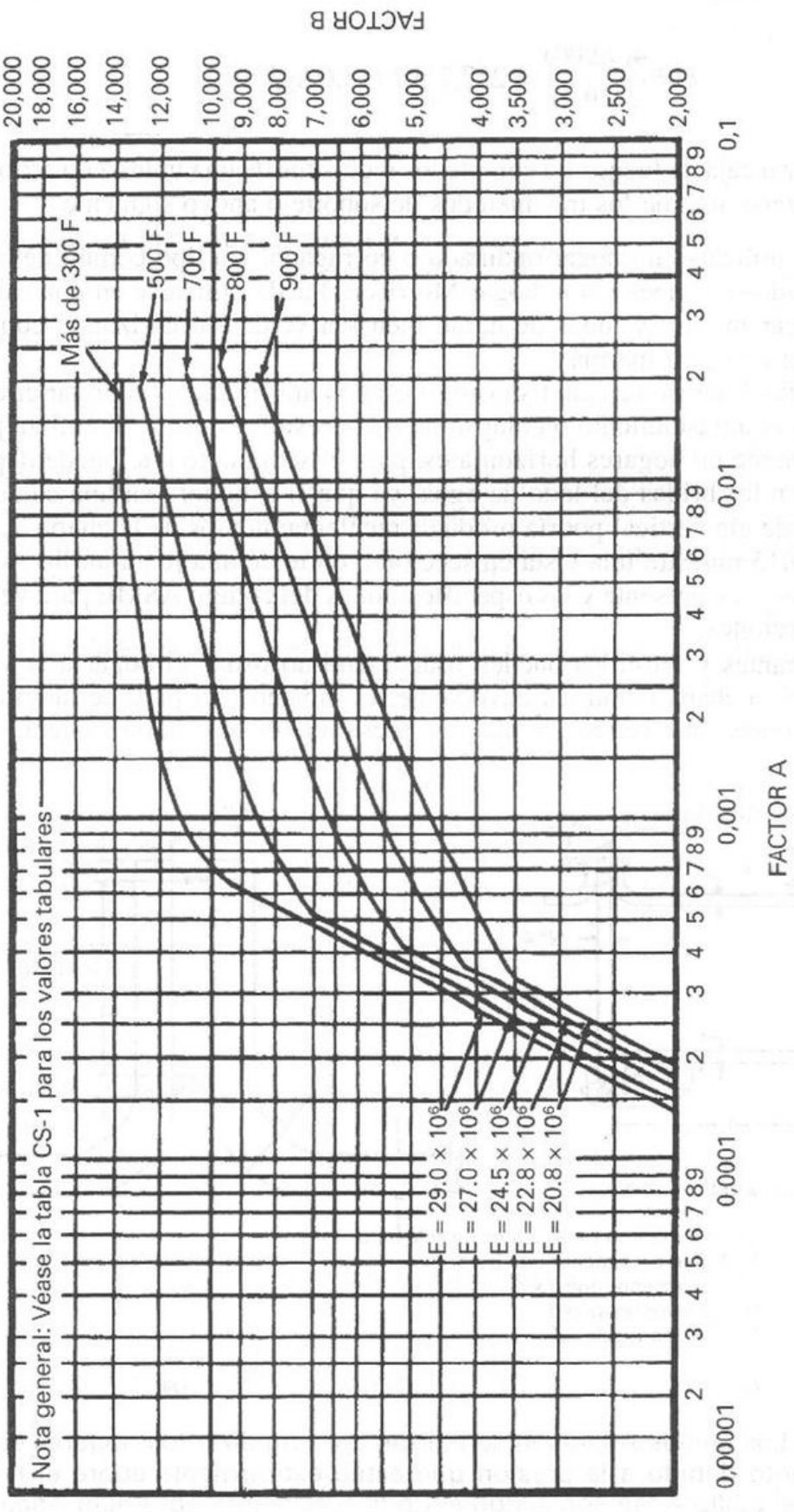


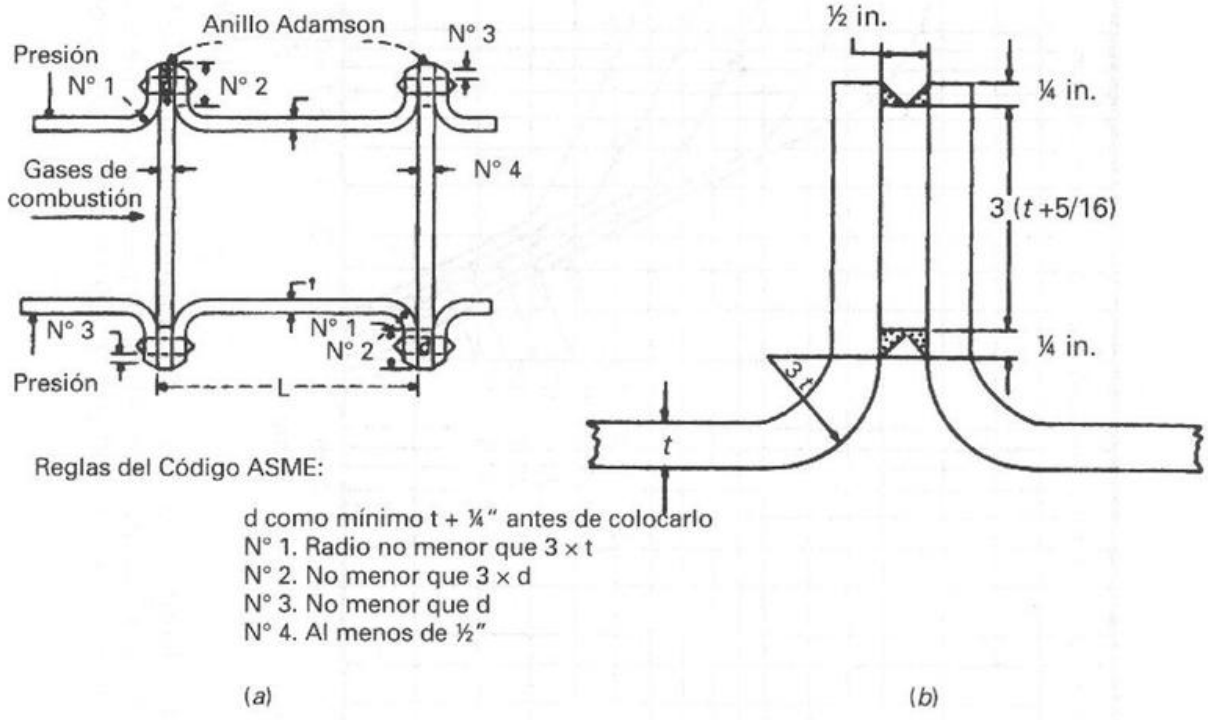
Figura 9.14. Tabla de la Sección II, parte D del código ASME para determinar el Factor B para tubos de calderas pirotubulares, chimeneas y hogares sometidos a presión externa y construidos de acero al carbono o de baja aleación con un límite elástico mínimo de 30.000 psi (2.100 kg/cm²) y superiores. (*Cortesía de American Society of Mechanical Engineers.*)

y sustituyendo valores:

$$p = \frac{4(9.900)}{3(59,4)} = 222,2 \text{ psi } (15,6 \text{ kg/cm}^2)$$

Si un hogar o caja de fuegos no cumple los requisitos de una unidad no arriostrada puede utilizarse uno de los tres métodos de soporte o apoyo siguiente:

1. Puede utilizarse un hogar ondulado o corrugado. Un tipo común de hogar ondulado se conoce como hogar Morrison. Puede utilizarse en una caldera de hogar interior y tubos de humo bien sea vertical u horizontal como la caldera escocesa marina.
2. El anillo Adamson es un dispositivo usado para rigidizar un hogar circular contra el aplastamiento o colapso bajo la presión exterior. Se utiliza principalmente en hogares horizontales, para el sedimento que puede depositarse en las bridas del lado de agua, ya que si estuviera en una caldera y hogar de eje vertical podría producir recalentamientos de la chapa. La Figura 9.15 muestra una vista en sección o corte de una junta-anillo Adamson pasada y presente y las especificaciones del código ASME para ver sus proporciones.
3. Los tirantes y virotillos pueden usarse para arriostrar el hogar a la virola exterior o chapa cilíndrica envolvente. El tamaño y el paso de las riostras tiene mucho que ver con la máxima presión admisible en la caldera.



Reglas del Código ASME:

d como mínimo t + ¼" antes de colocarlo
N° 1. Radio no menor que 3 × t
N° 2. No menor que 3 × d
N° 3. No menor que d
N° 4. Al menos de ½"

(*a*) (*b*)

Figura 9.15. Los anillos Adamson se utilizan para rigidizar los hogares contra el aplastamiento debido a la presión que actúa exterirmente sobre el hogar. (*a*) Detalles del anillo Adamson según el Código existente. (*b*) Anillo Adamson montado con soldadura y detalles para este tipo de construcción.

El lector debería consultar la normativa (tanto americana, ASME; como española, Normas UNE) para una especificación más completa para hogares no arriostrados, cuyos detalles no se dan por no tener cabida en el espacio de este libro, y los cuales dan énfasis a los métodos de análisis para determinar la presión admisible.

REFUERZO DE ABERTURAS DE VIROLAS

Al abrir un agujero de hombre en la virola de una caldera, es necesario compensar el metal retirado. Esto se hace instalando un bastidor de refuerzo o brida de refuerzo cuando se necesita.

El mínimo agujero de hombre elíptico permitido por el código ASME es de 11″ × 25″ (280 mm × 381 mm). Al cortar la chapa de virola para hacer un refuerzo del agujero de este tamaño, el eje menor de la elipse se coloca a lo largo del eje longitudinal de la caldera de modo que se requiere menos material de refuerzo para reemplazar en este eje direccional más débil.

Al considerar un plano de la sección recta de la chapa de la virola de caldera en las proximidades del corte del agujero de hombre es necesario hallar el área total del metal que se ha «quitado», incluyendo orificios de remaches, y suministrando y poniendo un refuerzo o marco del hueco que tenga igual sección recta de corte en el mismo plano de la virola si el espesor de la virola no tiene exceso de espesor.

El Código de calderas de potencia ha detallado requisitos sobre corte de aberturas en virolas o calderines y cómo calcular el refuerzo alrededor de la abertura o marco-bastidor del hueco si es necesario. Se aplica generalmente el siguiente procedimiento (véase la Figura 9.16 de la página siguiente). El área requerida para ser restaurada por la abertura acotada d es:

$$A = d \times t_r \times F$$

donde: d = diámetro de la abertura terminada en el plano, pulgadas o cm.
t_r = espesor necesario de la chapa sin costura para la presión.
F = factor que considera el eje del tubo o tubuladura que entra en la abertura, usualmente 1,00.

Para determinar si hay suficiente metal disponible de la virola, tubo o tubuladura, soldaduras o refuerzo, el Código proporciona las ecuaciones 9.5 y 9.6 (véase la Figura 9.16 para el significado de los símbolos y los límites).

Para determinar el material disponible o necesario de la *virola:*

$$A_1 = (t_s - Ft_{rs})d \quad \text{o} \quad A_1 = 2(t_s - Ft_{rs})(t_s - t_n) \tag{9.5}$$

Se usa el valor mayor.

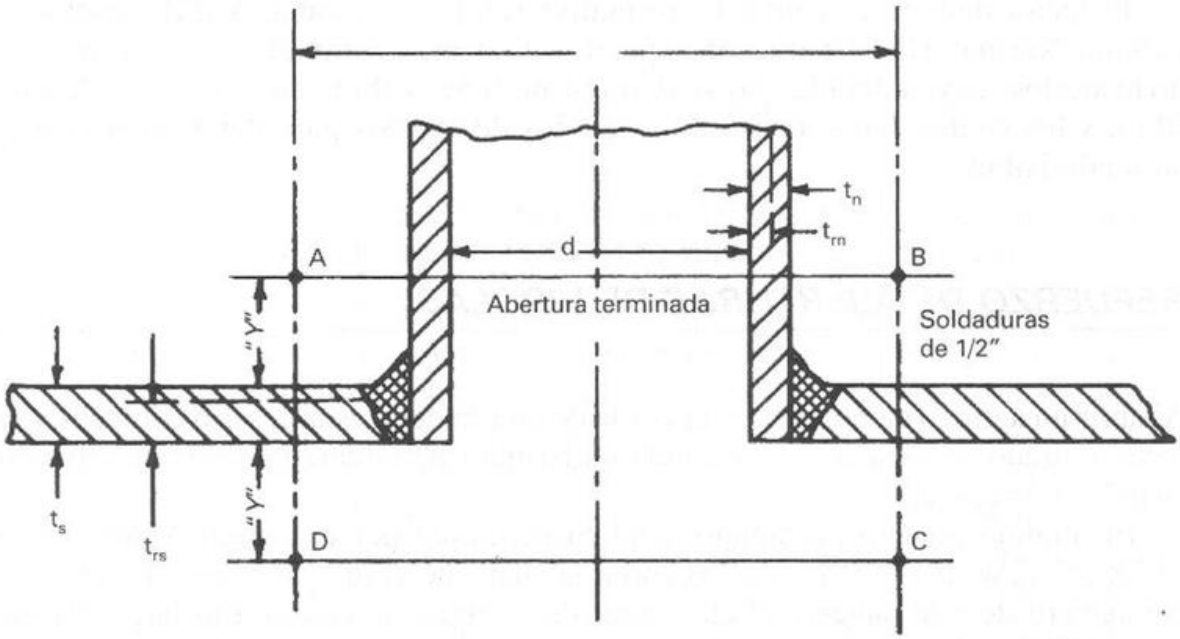


Figura 9.16. Los límites de refuerzo disponible en una conexión soldada de una tubuladura sobre una virola es el exceso de material disponible de la Virola, tubuladura, y cualquier anillo de refuerzo y soldaduras dentro de los límites del rectángulo ABC. Las distancias *X* e *Y* se especifican en el código y están ilustradas por el ejemplo del texto.

Para determinar el metal disponible o necesario del tubo o tubuladura insertado en la *abertura:*

$$A_2 = (t_n - t_{rn})5t_s \qquad \text{o} \qquad A_2 = (t_n - t_{rn})(5t_n) \tag{9.6}$$

Se utiliza el valor más pequeño.

Ejemplo. Una tubuladura de 5″ (127 mm) extra-pesada de acero SA-52 de grado S/A está soldada en una virola similar a la mostrada en la Figura 9.16 con soldaduras de 1/2″. La virola tiene un diámetro interior de 30″ (762 mm), un espesor de 7/16″ (11,11 mm) y una presión de trabajo de 200 psi (14 kg/cm^2). Todas las soldaduras cumplen los requisitos normativos. Esto incluye la soldadura resistente. El tubo de 5″ tiene un espesor de 0,375″ (9,64 mm) con un diámetro exterior de 5,563″. Usando los cálculos de la Sección I para el refuerzo de la abertura, demostrar si el refuerzo cumple los requisitos del Código para una presión de trabajo de 200 psi (14 kg/cm^2).

Solución. De la tabla de la Figura 3.9, la tensión admisible para el material de la virola es de 13.800 lb/in^2 (966 kg/cm^2) y la tensión admisible para el material del tubo es de 12.000 lbs/in^2 (840 kg/cm^2). Se usa la misma ecuación para determinar el espesor de la virola y del tubo utilizado la ecuación del cilindro sin costura, pero con él, el *factor C omitido*, o sea:

$$t = \frac{PR}{SE} - (1 - y)P$$

donde: t = espesor requerido, pulgadas o cm
P = presión admisible, psi o kg/cm^2
S = tensión admisible del material, Lbs/in^2 (o kg/cm^2)
E = 1
y = 0,4

Para la virola:

$$t_{rs} = \frac{200(15)}{13.800(1) - (0,6)(200)} = 0,219'' \ (5,57 \text{ mm})$$

Para el tubo:

$$t_{rm} = \frac{200(2,407)}{12.000(1) - 0,6(200)} = 0,04052'' \ (1,029 \text{ mm})$$

El área de refuerzo requerido es:

$A = d \times t_{rs} \times F$; con F = 1, ya que el tubo está insertado normalmente en la virola.

$$d = 5,563 - 2 \times 0,375 = 4,813''$$

$$A = 4,813(0,219)(1) = 1,054 \text{ in}^2$$

Áreas de refuerzo disponibles:
De la virola: $A_1 = (t_s - F \times t_{rs})d = 4,813\ (7/16 - 1.\ 0,219) = 1,052$ in^2
Del tubo: $A_2 = (t_n - t_{rm})5\ t_s = (0,375 - 0,040) \cdot 5 \cdot 0,375 = 0,628$ in^2
De las soldaduras: $A_3 = (1/2 \times 1/2 \times 1/2) \times 2 = 0,25$ in^2
Área total del refuerzo = ε = 1,932 in^2 que exceden del valor del área de refuerzo exigible (A = 1,054 m^2) aunque el área de refuerzo cumple los requisitos del Código.

IDENTIFICACIÓN DEL CÓDIGO DE CALDERAS

Los Estados y las autonomías exigen un sello o estampación identificatoria sobre las calderas de potencia. El Comité National Board de estampillado americano es suficiente para pasar y aprobar las normas y regulaciones de construcción en prácticamente todas las secciones de los EE. UU. Este sello consta de un símbolo ASME encima del número de serie del fabricante, el nombre del fabricante o abreviatura aprobada, la máxima presión para la cual la caldera ha sido construida, la superficie de calefacción y producción máxima y el año de construcción*.

En EE. UU., la placa del «National Board» seguida por un número de serie está situada para control de los inspectores del National Board de calderas y recipientes a presión. Es un requisito legal del código ASME de calderas de potencia, y una copia con los datos sobre la construcción se archivan con esta placa y número de serie. El

* *N. del T.:* En España, además de la placa con los datos del fabricante, producción, número de serie, habrá otra Placa Oficial de la Delegación del Ministerio de Industria con la presión efectiva máxima de servicio correspondiente a la instalación y las fechas y presiones periódicas de retimbrado de la instalación.

sello del National Board indica que la caldera está construida según el código ASME y que su construcción fue controlada por un inspector cualificado.

Sobre las calderas de tubos de humos horizontales (calentados por hogar exterior), el sello o placa debería estar situado en el centro del frente de la placa de tubos encima de la fila superior de tubos. Sobre las calderas horizontales de tubos de humos del tipo de hogar interior, la placa debería estar situada encima del centro, a mano derecha del hogar o encima del agujero o abertura de servicio manual al fondo trasero del hogar. Sobre las calderas verticales de tubos de humos, la placa o estampado debería estar situada sobre la portezuela del hogar. Las calderas de tubos de agua tienen la placa sobre el calderín encima de la brida del agujero de hombre.

Es muy importante cuando se adquiere o se cambia de situación a una caldera averiguar la legislación estatal sobre calderas. Muchos estados exigen cumplimentar un formulario especial y seguir un procedimiento definido antes de volver a instalar una caldera*.

USO DE LAS ECUACIONES NORMATIVAS

Los cálculos del Código revisados en este capítulo fueron diseñados para mostrar cómo se obtiene la presión admisible para los diferentes componentes o piezas de una caldera. Aquellos lectores que se estén preparando para los exámenes de operador o inspector deberían anotar y tener en cuenta el método de ataque requerido para resolver problemas de resistencia de componentes de caldera basándose en las fórmulas o ecuaciones del Código. Deben también darse cuenta que el método ilustrado no sólo se aplica en las calderas de nueva construcción. Los operadores de calderas y los inspectores así como los reparadores deberían revisar las ecuaciones y requisitos del Código (en España, las UNE) cuando se enfrenten a problemas existentes en las instalaciones actuales. Utilizando las ecuaciones adecuadas para el componente o pieza que requiera revisión debe alcanzarse u obtenerse una decisión sobre las adecuadas reparaciones según el Código que restablezca la resistencia de la pieza, si es que se hubiese visto afectada. Es posible también determinar tasas de desgaste sobre componentes o piezas por comparación del espesor actual, por ejemplo, con el requerido según los métodos ilustrados en este capítulo. Esto ayudará a calcular la vida remanente de las piezas o componentes y puede incluso implicar el cambio de la presión admisible hasta que se hagan las correspondientes reparaciones. La intención de este capítulo es mostrar cómo se calculan las presiones admisibles de modo que pueda tomarse una decisión de ingeniería sobre cómo proceder cuando surjan unas condiciones o situación cuestionables.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

1. ¿Cuáles son las principales desventajas de una junta solapada longitudinal?

RESPUESTA: La mayor desventaja de una junta longitudinal remachada o soldada a solape longitudinal es que la chapa está solapada; o sea que el calderín o virola no forma

* *N. del T.:* Análogamente en España se exige una inspección y retimbrado por Industria.

realmente un verdadero círculo. Puede tener lugar un cierto grado de tensión de flexión a lo largo del solape de unión cuando la virola se somete a presión. Esto produce una concentración de tensiones que eventualmente puede dar lugar a fatiga y rotura de la chapa, provocando así una desastrosa explosión de caldera.

Acerca de las únicas «ventajas» de la junta remachada o soldada con solape digamos que son su bajo coste, simplicidad, mínima anchura y mínimo espesor total donde la unión se expone al calor, como en uniones solapadas de algunas calderas pirotubulares.

2. ¿Cuál es el máximo diámetro y presión que puede permitirse en una caldera cuya unión longitudinal está soldada por fusión al arco y no ha sido reconocida o radiada por rayos X, ni descargada de tensiones residuales?

RESPUESTA: 16″ (400 mm) de diámetro interno y 100 psi (7 kg/cm^2) de presión. Las especificaciones de construcción son las de calderas pequeñas (miniatura).

3. Una caldera de tubos de agua aprobada y de acuerdo al Código, tiene 52″ (1.320 mm) de diámetro interno, con un espesor de chapa del calderín de 2″ (50,8 mm) en la zona de unión del citado calderín. El material o acero de la chapa es del tipo SA-515 Gr70 con una tensión admisible para trabajar por debajo de 650 °F (343 °C) de 17.500 lbs/in^2 (1.225 kg/cm^2). ¿Cuál es la mínima eficiencia requerida para la soldadura para una presión admisible de 600 psi (42 kg/cm^2)?

RESPUESTA: La ecuación de la Sección I para construcción soldada o tubo sin costura:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(t - C)}$$

con: R = radio interior del cilindro = 26″
t = espesor mínimo requerido = 2″
C = factor de calderín o virola = 0
y = factor según temperatura para < 900 °F = 0,4
P = presión máxima admisible = 600 psi
S = máxima tensión admisible = 17.500 lbs/in^2

Despejando E y sustituyendo:

$$E = \frac{P[R + (1 - y)(t - C)]}{S\,(t - C)}$$

$$E = \frac{600[26 + (1 + 0{,}4)(2)]}{17.500(2)} = 0{,}466 = 46{,}6\,\%\text{ de eficiencia}$$

4. ¿Cuál es la mayor abertura permitida en una virola sin cálculo de refuerzo en una unión soldada?

RESPUESTA: Un tubo de 2″ de diámetro.

5. Un fondo curvado cóncavo a presión tiene 5/8″ (15,9 mm) de espesor y 26″ (660,4 mm) de diámetro. ¿Cuál es la longitud mínima de unión o brida permitida cuando la unión es soldada a la virola o calderín?

RESPUESTA: El radio del ángulo no debe ser menor de 3 veces el espesor del fondo o en ningún caso menor del 6 por 100 del diámetro de la virola, o sea:

$$3 \times \frac{5}{8} = \frac{15}{8} = 1\,\frac{7''}{8}, \text{ o bien, el } 6\,\% \text{ de } 26'' = 1{,}56''$$

La unión debe ser al menos de $1\ ^{7}/_{8}''$ (valor mayor).

6. En la fabricación de una caldera pequeña (miniatura) de construcción totalmente soldada, que no está radiada con rayos X ni eliminadas sus tensiones residuales y que se utiliza para una presión de trabajo máximo de 100 psi (7 kg/cm^2), ¿qué presión debe usarse para probar esta caldera hidrostáticamente?

RESPUESTA: 300 psi (21 kg/cm^2) según el Código.

7. Un calderín de caldera está taladrado para conectar los tubos en una serie de filas paralelas a su eje; los tubos circunferencialmente están alineados. El diámetro de los agujeros de los tubos es de 4,03125″ (102,4 mm) y están igualmente espaciados en cada fila en grupos de 13,5″ (342,9) entre centros [tubos con paso alternativo de $7\ ^{1}/_{2}''$ (190,5 mm) y 6″ (152,4 mm)]. Determinar la eficiencia o rendimiento de la unión E y el mínimo paso circunferencialmente.

RESPUESTA: Utilice:

$$E = p - \frac{nd}{p}$$

con: $p = 13{,}5''$

$n = 2$

$d = 4{,}03125''$

Sustituyendo valores:

$$E = \frac{13{,}5 - 2(4{,}03125)}{13{,}5} = 0{,}403 = 40{,}3\,\%$$

Para hallar el paso en la dirección circunferencial, utilizamos la misma ecuación resuelta en P; es decir $pE = p - nd$, $p = p(1 - E)$ o sea $p = nd/1\text{-}E$ con los valores siguientes: $E = 0{,}403/2 = 0{,}202$ y $n = 1$ ya que los tubos están alineados, o sea:

$$P = \frac{nd}{1 - E} = \frac{1(4{,}03125)}{1 - 0{,}202} = 5{,}05''$$

paso circunferencial = 5,05″ (128,3 mm)

8. ¿Cuál es el espesor mínimo requerido para una chapa tubular de un calderín de caldera de tubos de agua con las siguientes especificaciones?

Presión de trabajo: 675 psi (47,25 kg/cm^2)
Radio interior: 27″ (685,8)
Eficiencia del taladro circunferencial del calderín: 31,1 %

Eficiencia del taladro longitudinal del calderín: 46,6 %
Eficiencia de la junta o unión circunferencial: 100 %
Material: acero SA-515-70.
Temperatura: 650 °F (343,3 °C)
Tensión admisible: 17.500 lbs/in^2 (1.225 kg/cm^2) para este material.

RESPUESTA:

$$t = \frac{PR}{SE - (1 - y)P} = \frac{675 \times 27}{17.500(0{,}466) - (1 - 0{,}4)(675)} = 2{,}35'' \ (59{,}69 \text{ mm})$$

basado en la eficiencia del taladrado longitudinal.

9. (*a*) ¿Por qué son ovales las tapas de los agujeros de hombre y agujeros de servicio manual?
(*b*) ¿Por qué se usa agua en vez de vapor o aire para probar una caldera?
(*c*) ¿Qué precauciones es necesario tomar sobre las válvulas de seguridad y tubos de vapor cuando se hace la prueba hidrostática a una caldera en batería?

RESPUESTA:

(*a*) Para permitir al operador retirarlas de la caldera y acceder a su interior. Un agujero de hombre oval también proporciona la mayor abertura de entrada con la mínima eliminación de material. El eje mayor del agujero de hombre debería estar cruzado o periférico en la virola.
(*b*) La incompresibilidad del agua (líquida) evita explosiones.
(*c*) Utilizar bridas de prueba o retirar las válvulas de seguridad y taponar los bridas o tuercas ciegas. Desconectar válvulas de cierre y taponar los finales de las tuberías de vapor.

10. (*a*) ¿Qué efecto produce una chapa o perfil conformado en un cilindro para conservar su forma?
(*b*) ¿Cuál es la máxima distorsión permisible en un calderín soldado de caldera de tubos de agua?

RESPUESTA:

(*a*) El arriostrado y tensado de la fibra exterior de la chapa hasta su límite elástico.
(*b*) 1 por 100 del diámetro medio.

11. (*a*) En una caldera, ¿por qué se limita la presión hidrostática a 1,5 veces la máxima presión de trabajo admisible?
(*b*) ¿Qué virtudes tiene esta prueba?
(*c*) ¿Por qué hay una temperatura mínima y máxima para el agua durante la prueba hidrostática? ¿Cuáles son las temperaturas mínima y máxima?

RESPUESTA:

(*a*) Porque una presión mayor puede dañar la chapa de la caldera produciendo una deformación permanente.
(*b*) Prueba la hermeticidad (estanqueidad) de las partes o piezas de la caldera y su tensión.
(*c*) Porque las piezas y zonas de la caldera y agua estarán aproximadamente a la misma temperatura. La temperatura no debe ser menor de 70 °F (21 °C) para evitar

condensaciones. Esto podría enmascarar una fuga a través de un defecto, y la temperatura del metal no debe pasar de 50 °C (120 °F) para poder examinar de cerca las soldaduras y zonas de unión similar.

12. Determinar la presión de trabajo admisible en un fondo hemisférico no arriostrado de construcción soldada con las siguientes especificaciones: 48″ (1.219 mm) de diámetro interno, la presión se ejerce sobre el lado cóncavo, espesor de la chapa = 3/8″ (9,53 mm), eficiencia de la soldadura = 100 por 100; material: acero SA-285C con una presión admisible de 13.800 lbs/in^2 (966 kg/cm^2).

RESPUESTA: Utilice la ecuación:

$$t = \frac{PL}{(1{,}6)S}$$

Despejado P y sustituyendo, se obtiene:

$$P = \frac{1{,}6St}{L} = \frac{1{,}6(13.800)(0{,}375)}{24} = 345 \text{ psi} = 24{,}15 \text{ kg/cm}^2$$

13. ¿Cuál es el mínimo espesor requerido permitido para un fondo plano circular forjado integralmente sobre un colector que cumple todos los requisitos del Código? El diámetro D es de 22″ (558,8) y la presión requerida es de 150 psi (10,5 kg/cm^2). La máxima tensión admisible S es 11.000 lbs/in^2 (770 kg/cm^2).

RESPUESTA: Tenga en mente que $C = 0{,}17$:

$$t = D\sqrt{\frac{CP}{S}} = 22\sqrt{\frac{0{,}17(150)}{11.000}} = 1{,}059'' \text{ (26,9 mm)}$$

14. (*a*) Cite dos características importantes a resaltar en relación con una abertura de hombre conformada con rebordeado (bridado) de la chapa del calderín (hacia adentro) de una caldera.

(*b*) ¿Por qué es preferible que los fondos soldados a tope a la virola tengan un faldón o brida cuando se unen por soldadura de fusión?

RESPUESTA:

(*a*) La chapa debe estar conformada o solapada hasta una profundidad de no menos de tres veces el espesor y las superficies de apoyo de la junta no deben ser menores de 11/16″ (17,46 mm).

(*b*) Para evitar la concentración de tensiones en el borde de la brida.

15. ¿En qué tanto por ciento puede adelgazarse (disminuir su espesor) el borde de un fondo curvado al conformarlo en la prensa?

RESPUESTA: No más de un 10 por 100.

16. Las riostras en la caja de fuegos (hogar) de una caldera tipo locomotora están espaciadas horizontalmente 7″ (178 mm) y verticalmente 6 1/2″ (165 mm) y son de un diámetro de 1 $^1/_4$″ (31,75 mm) con 12 pasos de rosca en V por pulgada. El espesor de chapa es de 1/2″. Los extremos de los tornillos-riostras están taladrados con orificios de seguridad de 3/16″ (4,763 mm) y el área del orificio de seguridad es de 0,0276 in^2 (619,35 mm^2).

¿Cuál es la presión admisible de trabajo en el hogar? Se dan los datos siguientes: Chapa de acero SA-285 grado C y a 600 °F (315 °C); tensión admisible, 13.700 lb/in^2 (959 kg/cm^2); área del tornillo riostra con el fondo de la rosca, 0,960 in^2.

RESPUESTA: Utilice la ecuación del tornillo-riostra:

$$(p^2 - a)P = \frac{(a - 0{,}0276)S}{1{,}1}$$

donde: a = área del tornillo-riostra.
p = área de soporte paso máximo, in^2.

Despejando P y sustituyendo valores:

$$P = \frac{(a - 0{,}0276)S}{1{,}1 \times (p^2 - a)} = \frac{(0{,}96 - 0{,}276)13.700}{1{,}1(7 \times 6{,}5 - 0{,}96)} = 264{,}5 \text{ psi } (18{,}5 \text{ kg/cm}^2)$$

También es necesario calcular la presión admisible, basándonos en el espesor de la chapa entre riostras. Utilice:

$$P = \frac{St^2C}{6{,}5 \times 7} \qquad \text{con } C = 2{,}2$$

Sustituyendo:

$$P = \frac{13.700(0{,}5)^2(2{,}2)}{6{,}5 \times 7} = 165{,}6 \text{ psi } (11{,}6 \text{ kg/cm}^2)$$

Ésta será la presión admisible.

17. ¿Qué presión hidrostática se requiere para un calderín de caldera de tubos de agua soldado con una eficiencia de soldadura longitudinal del 100 por 100, espesor de la chapa de $1\,{}^5/_{16}''$ (30,4 mm) en esta junta con un radio interior de 27,25" (692,15). La chapa tubular es de un espesor de $1\,{}^{15}/_{16}''$ (49,21 mm) con un radio interior de $26\,{}^{15}/_{16}''$ (684,21 mm). La eficiencia de la unión tubular es 0,304 circunferencial y 0,429 longitudinal. El material de la chapa es acero SA-515 grado 70, trabajando a 650 °F (343 °C) con una tensión admisible de 17.500 lbs/in^2 (1.225 kg/cm^2).

RESPUESTA: Nótese que la eficiencia de la unión circunferencial es mayor que un medio de la eficiencia de la unión longitudinal de 0,429; por tanto, la presión admisible está basada en esta eficiencia de unión longitudinal y en los datos de la chapa tubular. Usando la ecuación de la chapa, con $C = 0$:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(t - C)}$$

donde $C = 0$ y $y = 0{,}4$.

$$P = \frac{17.500(0{,}429)1{,}9375}{26{,}9375 + (1 - 0{,}4)(1{,}9375)} = 517{,}64 \text{ psi } (36 \text{ kg/cm}^2)$$

Según el Código la presión hidrostática de prueba requerida es de $1{,}5 \times 518 = 777$ psi (54,4 kg/cm^2).

18. ¿Cuál sería el radio de curvatura de un fondo no arriostrado si la chapa es de 1/2″ (12,7 mm) de espesor y el diámetro del calderín es de 48″ (1.219,2 mm)?

RESPUESTA: 48 × 0,06 = 2,88″ (73,15 mm).

19. ¿Por qué las superficies planas en una caldera están arriostradas o reforzadas?

RESPUESTA: Una chapa plana sometida a presión tiende a asumir la forma esférica, así que las riostras o tirantes se utilizan para impedirlo y mantenerla en su sitio.

20. ¿Cómo se taladrarían los agujeros de seguridad en los tornillos-riostras?

RESPUESTA: Los tornillos macizos de 8″ (203,2 mm) y menos de longitud deberán taladrarse con orificios de seguridad al menos de 3/16″ (4,76 mm) de diámetro a una profundidad al menos de 1/2″ (12,7 mm) más allá del interior de la chapa.

21. ¿Por qué el paso de los tirantes o tornillos riostras en una caldera tubular vertical se toma desde el interior del hogar (cajas de fuego) en vez desde el exterior de la virola?

RESPUESTA: La chapa del hogar es la chapa que normalmente requiere arriostramiento; por tanto, el paso se toma desde el interior del hogar.

22. Cite tres métodos utilizados para reforzar un hogar para resistir el colapso o aplastamiento.

RESPUESTA: Sobre una caldera tubular vertical mediante tornillos riostras o tirantes riostras, sobre hogares horizontales mediante la utilización de anillos Adamson; y mediante corrugaciones u ondulaciones.

23. ¿Qué es un anillo Adamson, dónde se usa y para qué propósito?

RESPUESTA: Es una junta tipo brida entre dos o más secciones de un hogar cilíndrico. Se coloca en algún punto a lo largo de la longitud del hogar, puede haber uno en el centro o varios separados a intervalos a no menos de 18″ (457 mm) por parte o zona (arriostrada). Sirve como refuerzo, rigidizando el hogar contra la presión de aplastamiento o colapso. El anillo entre bridas también sirve como relleno para la estanqueidad.

24. Un agujero de paso de hombre de 16″ (406 mm) de diámetro interior, tubular (del tipo soldado), está localizado sobre un calderín soldado. Los datos pertinentes son (véase la Figura 9.16):

Espesor del cuello soldado (garganta de soldadura), 3/4″ (19,05 mm).
Espesor de la chapa de calderín, $1\frac{1}{8}$″ (28,75 mm).
Diámetro interior de la chapa o virola del calderín, 48″ (1.219 mm).
Presión de trabajo, 500 psi (35 kg/cm^2).
Temperatura de trabajo, no superior a 600 °F (315,6 °C).
La soldadura utilizada cumple con el Código de calderas.
La tubuladura está soldada al calderín interior y exteriormente con filetes de soldadura de 3/4″ × 3/4″.
El anillo de refuerzo en el interior del calderín es de 1″ de espesor, con un diámetro interno de 21,5″ (596,1 mm) y un diámetro exterior de 36″ (914,4 mm).
La parte interior (del anillo) soldada al calderín con filetes de soldadura es de 1″ × 1″ (25,4 mm × 25,4 mm).

El material de la tubuladura del calderín y el anillo de refuerzo tienen una tensión de diseño de 15.000 lbs/in^2 (1.050 kg/cm^2).

Suponer que la soldadura cumple los requisitos del Código y demostrar por cálculo que el refuerzo es adecuado para cumplir los requisitos del Código.

RESPUESTA: Para la virola:

$$t_{rs} = \frac{\text{PR}}{SE - (1 - y)P} = \frac{500(24)}{15.000 - (1 - 0{,}4)(500)} = 0{,}816'' \ (20{,}726 \text{ mm})$$

Para la tubuladura:

$$t_{rs} = \frac{500(8)}{15.000 - 0{,}6(500)} = 0{,}272'' \ (6{,}9 \text{ mm})$$

El área de refuerzo requerida es

$$A = d \times t_{rs} \times \text{F} = 16 \times 0{,}816 \times 1 = 13{,}056 \text{ in}^2 \ (84{,}232 \text{ cm}^2)$$

El área de refuerzo que se coloca es:

A_1 (virola) = $[(1 \times t_s) - F \times t_{rs})]$ d = $[1.125 - 1 \times 0{,}816) \times 16'' = 4{,}94$ in^2

A_2 (tubuladura) = $(2 \times t_s - F\, t_{rs}) \times (t_s - t_{rs}) = 2\ (1{,}125 + 1{,}125)\ (0{,}75)\ (0{,}75 - 0{,}272) +$
$+ 2 \times 0{,}75^2 = 2{,}918$ in^2

A_3 (soldaduras) = $2 \times t^2 + F \times t_{\text{anillo}} = 2 \times 0{,}75^{\ 2} + 1 \times (1{,}00)^2 = 2{,}125$ in^2

A_4 (anillo) = $1{,}0 \times (32 - 21{,}5) = F\ (\varnothing_{\text{ext.anillo}} - \varnothing_{\text{int.anillo}}) = 10.500$ in^2

$A_{\text{total}} = 20{,}487$ in^2.

La construcción cumple con los requerimientos del Código.

25. Una caldera de alta temperatura pesa 50.000 lbs (22.700 kg) y está soportada por columnas con vigas de soporte y arriostramiento. Las calderas tienen los adecuados puntos de conexión en cuatro puntos para recibir tornillos en U, que están suministrados con arandelas y tuercas; la tensión admisible es de 6.000 lbs/in^2 (420 kg/cm^2) sobre estos tornillos ¿Cuál es el diámetro de estos tornillos en su sección más débil (roscada)?

RESPUESTA: Cada tornillo debe cargar 50.000 lbs dividido por 4, o sea, 12.500 lbs. Así pues, el área de la sección del tornillo reducido será 12.500 lbs dividido por la tensión admisible, 6.000 lbs/in^2, es decir, 2083 in^2 = A. El diámetro del tornillo requerido será la raíz cuadrada de A dividida por $\pi/4 = 0{,}7854$ o sea 1,628" por lo que los tornillos serán de 1 $^5/_8$" (41,27 mm) de diámetro.

26. Una vieja caldera horizontal de tubos de humos (HRT) de 72" (1.829 mm) de diámetro y de 1/2" (12,7 mm) de espesor de chapa de virola, con un límite elástico de 55.000 lbs/in^2 (3.850 kg/cm^2), eficiencia de junta longitudinal del 87,5 por 100, factor de seguridad de FS = 5, ha estado operando a 133 psi (9,31 kg/cm^2). La inspección reveló que el fondo de la virola de su primera parte medía sólo 5/16" (7,9 mm) de espesor debido a una corrosión bastante importante.

(*a*) ¿Cuál debería ser la presión admisible basada en esas zonas más debilitadas?

(*b*) ¿A qué factor de seguridad, FS, estuvo trabajando la caldera?

RESPUESTA:

(*a*) Como la corrosión tiene lugar en la chapa, utilice:

$$E = 1$$

$$S = \frac{55.000}{5} = 11.000 \text{ lbs/in}^2 = 770 \text{ kg/cm}^2$$

$$R = \frac{\varnothing}{2} = \frac{72''}{2} = 36'' \ (914{,}4 \text{ mm})$$

$$t = \frac{5}{16''} = 0{,}3125'' \ (7{,}94 \text{ mm})$$

$$y = 0{,}4$$

Así que:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(t - C)} = \frac{11.000(1)(0{,}3125)}{36 + (1 - 0{,}4)0{,}3125} = 94{,}99 \text{ psi } (6{,}6 \text{ kg/cm}^2)$$

(*b*) Use 55.000 lbs/in^2 en la misma ecuación de la virola y resuelva o despeje FS con $p = 133$ psi:

$$FS = \frac{SEt}{p(R + (1 - y)t} = \frac{55.000(1)(0{,}3125)}{133[36 + 0{,}6(0{,}3125)]} = 3{,}57 \text{ en vez de } FS = 5$$

27. Una caldera horizontal pirotubular con hogar interior de 66″ × 16″ (1.676 mm × 406 mm) trabajando a 125 psi (8,75 kg/cm^2), tiene 66 tubos de 3 $^1/_2$ de diámetro galga 11 (88,9 mm). ¿Cuál es la superficie de calefacción si uno usa la medià de la virola e ignora los fondos?

RESPUESTA:

$$S_{\text{calefactora de virola-hogar}} = \pi \times \varnothing \times \frac{L}{2} = \frac{66 \ (3{,}14) \ (16)}{12 \cdot 2} = 138 \text{ ft}^2$$

$$S_{\text{calefactora de los tubos de humo}} = \frac{3{,}14 \times 66 \times 16 \times 3{,}26}{12} = 901 \text{ ft}^2$$

Total superficie de calefacción = 1.039 ft^2 (93,51 m^2)

Además se exigen dos o más válvulas de seguridad.

28. ¿Quién tiene la responsabilidad para establecer y mantener un sistema de control de calidad en la fabricación de calderas?

RESPUESTA: El fabricante y/o responsable del montaje de conjunto o destinatario del certificado de autorización ASME.

29. Explique brevemente qué información debe conservar el fabricante en el registro de seguifiiento del control de calidad.

RESPUESTA: En general, un seguimiento debería incluir lo siguiente:

1. Dibujos y planos del recipiente o caldera que se está fabricando o montando.
2. Cálculos demostrativos del cumplimiento del Código en lo que se refiere a espesor, materiales y requisitos similares.
3. Identificación del material a utilizar, incluyendo dimensiones y calidad a suministrar por los siderúrgicos u otros suministradores.
4. Inspecciones realizadas sobre material y fabricación durante los controles designados.
5. Cualificación de todo personal que lleve a cabo cualquier prueba o examen NDE.
6. Cualificación de todo soldador que realice soldaduras y procedimientos escritos aplicables de soldaduras.
7. Requisitos de pruebas NDE sobre radiografías u otras pruebas no destructivas.
8. Reparaciones de pruebas hidrostáticas realizadas y un registro de hojas de datos de la caldera o del recipiente (calderín, calderines, etc.).

30. (*a*) ¿Quién es responsable de mantener registros de todo recipiente construido de acuerdo con el código ASME?
(*b*) ¿Cuánto tiempo deben conservarse estos registros?

RESPUESTA:
(*a*) El fabricante o quien realice el ensamblaje o montaje y sea responsable por tanto de obtener los certificados y permisos oficiales, excepto con vasijas nucleares, donde la responsabilidad es del propietario de la central nuclear, según la normativa NCR y ASME.
(*b*) Al menos durante cinco años por el fabricante; indefinidamente para vasijas y recipientes nucleares por el propietario de la central.

31. ¿Cuál es la presión admisible sobre un fondo de 1.200 mm, convexo, de 48″ de diámetro que no está arriostrado y que lleva una abertura de hombre de 48″ de diámetro, radio de bombeo 36″ (914 mm), tensión admisible de 13.750 lbs/in^2 (963 kg/cm^2) y espesor del fondo de 1,0625″?

RESPUESTA: Debe usarse la ecuación del segmento esférico a causa del agujero de hombre y el espesor debe reducirse un 15 por 100 o $t = \dfrac{1{,}0625}{1{,}15} = 0{,}924''$. También según el Código, a los fondos convexos se les permite sólo un 0,6 de la presión admisible de los cóncavos. Así pues, sustituyendo valores en la ecuación:

$$P = \frac{4{,}8\ St}{5L} = \frac{4{,}8(13{,}750)(0{,}924)(0{,}6)}{5(38{,}4)} = 190{,}58 \text{ psi } (13{,}3 \text{ kg/cm}^2)$$

L = radio = R = 0,8(48) = 38,4, ya que el fondo elíptico es menor que 0,8 veces el diámetro del fondo y el Código exige que un fondo elíptico sea construido al menos equivalente al fondo con un radio de 0,8 veces el diámetro del fondo.

32. Una caldera pirotubular necesita que 374 in^2 de superficie plana sea arriostrada con tornillos-riostras. La disposición muestra un espaciado de tornillos de $5\ ^1/_4'' \times 5\ ^1/_2''$ cubriendo el área. Si el material de arriostramiento tiene una tensión admisible de 11.300 lbs/in^2 (791 kg/m^2) y los tornillos-riostras con agujeros de seguridad de 3/16″ de diámetro. ¿Cuántos tornillos-riostras y de qué diámetro se requieren para una presión admisible de 150 psi (10,5 kg/m^2)?

RESPUESTA: El número de tornillo requerido es:

$$\frac{374}{5{,}25 \times 5{,}25} = 13$$

Con a = área neta de la parte inferior del tornillo taladrado y área del orificio de seguridad = 0,0276, utilizamos la ecuación del tornillo-riostra para despejar a como sigue:

$$(p^2 - a)P = \frac{S(a - 0{,}0276)}{1{,}1}$$

$$[(5{,}25)(5{,}50) - a]150 = 11.300\left[\frac{a - 0{,}0276}{1{,}1}\right]$$

Resolviendo:

$$a = 0{,}442 \text{ in}^2 \ (2{,}85 \text{ cm}^2)$$

Un tornillo roscado de 15/16″ en $V(12)$ tiene un área de 0,494 cm^2 que menos 0,0276 del taladro da un área neta de 0,466 in^2 luego puede utilizarse el tornillo de 15/16″ de rosca en V.

33. Una placa tubular de una caldera pirotubular tiene un diámetro de 72″ con una distancia desde los tubos de humos superiores al interior de la chapa-virola de 30″. ¿Cuál es el área a arriostrar?

RESPUESTA: Con d = 0 y R = 36″:

$$A = \frac{4(H - d - 2)^2}{3}\sqrt{\frac{2(R - d)}{(H - d - 2)} - 0{,}608}$$

$$A = \frac{4(30 - 2)^2}{3}\sqrt{\frac{2(36)}{30 - 2} - 0{,}608} = 1.464{,}7 \text{ in}^2 \ (9.4499{,}6 \text{ cm}^2 = 0{,}9945 \text{ m}^2)$$

Capítulo 10

CONEXIONES, ACCESORIOS Y CONTROLES DE LAS CALDERAS

La Figura 10.1 de la página siguiente ilustra los múltiples conexiones y accesorios que se requieren en una caldera de alta presión que puede conectarse a un colector principal de vapor. Todas las conexiones de tuberías y válvulas sirven para un propósito en la operación y mantenimiento, y la mayoría están regidas por la Sección I del código ASME (en Estados Unidos y el reglamento de calderas del Miner en España) por lo que respecta a tamaño e instalación. El Código requiere como mínimo: 1) un manómetro de presión, nivel de agua de vidrio, grifos de nivel, una válvula de corte en la línea de vapor y válvulas de corte y comprobación en la línea de alimentación de agua; 2) adicionalmente al mínimo antes citado, se necesitan las bombas de alimentación de caldera y/o inyectores de agua. Los cortes de combustible por bajo nivel de agua en las calderas alimentadas automáticamente se requieren ahora por la mayoría de las reglamentaciones. No sólo en las calderas de baja presión, sino también en las de alta presión. Los dispositivos de seguridad de la combustión están llegando a ser una necesidad imprescindible en calderas que queman fuel-oil en suspensión o gas natural. Estos temas se ven en capítulos posteriores. El término accesorio de caldera se aplica a válvulas, manómetros y otras conexiones o dispositivos que están conectados directamente a la caldera de forma que la unidad o unidades pueden operarse segura y eficientemente.

Definiciones aplicables. Véase también Apéndice 1, «Terminología y definiciones».

1. *Válvula de seguridad*: Evita que la presión de la caldera suba por encima del valor de ajuste librando de la presión del vapor excesiva y protegiendo contra los riesgos de la sobrepresión.
2. *Válvula de corte del suministro de vapor*: Es la válvula instalada en la salida de vapor de la caldera para cortar el flujo de vapor.
3. *Manómetro de presión de vapor*: Indica la presión de vapor en la caldera en libras por pulgada cuadrada o kilogramos por centímetro cuadrado.

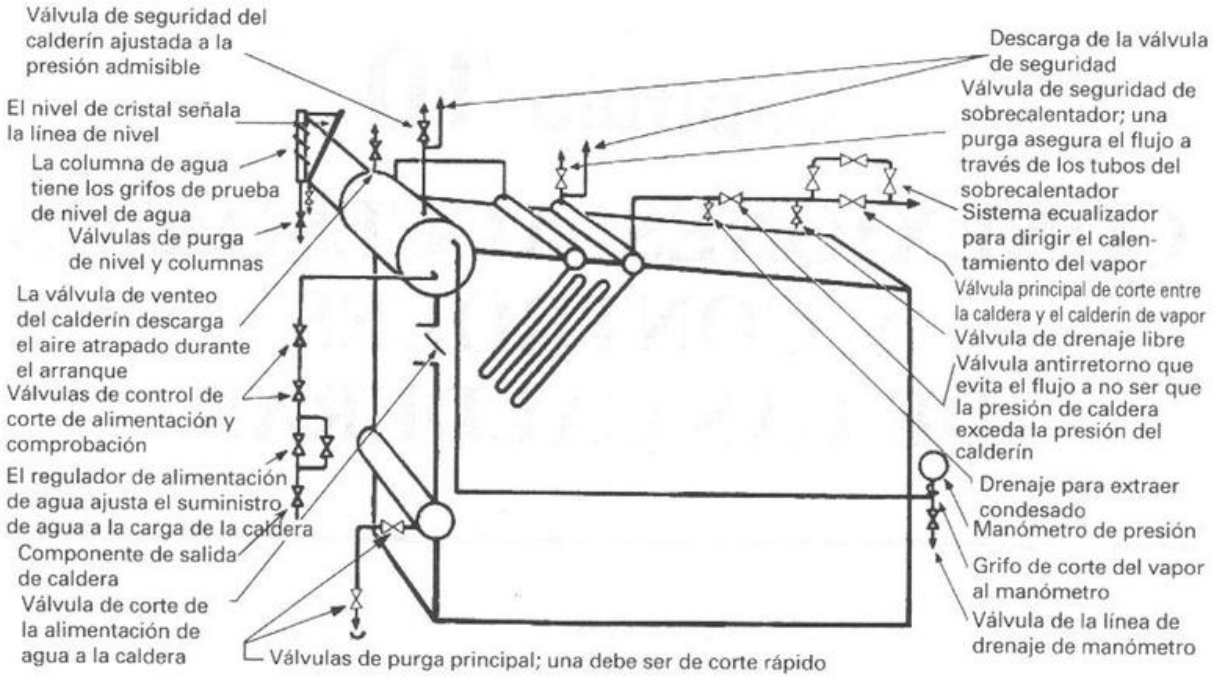


Figura 10.1. Las conexiones y accesorios en una caldera de alta presión cumplen una importante función en la operación e inspección y la mayoría son requeridas por el código ASME. (*Cortesía de Power magazine.*)

4. *Sifón* del manómetro de vapor*: Dispositivo instalado entre el manómetro de vapor y la caldera para dar un sellado de agua, de modo que el vapor vivo no entre en el manómetro produciendo una falsa lectura o daño al mismo.
5. *Conexión y grifo de inspección y prueba del manómetro*: Proporciona la conexión necesaria para comprobar la precisión del manómetro de presión de vapor de la caldera.
6. *Columna de agua*: Es el dispositivo en fundición o acero forjado hueco conectado a la parte superior de la cámara de vapor de la caldera y a la parte superior del espacio de agua. El nivel de agua de cristal y los grifos de prueba de agua están instalados en la columna.
7. *Nivel de agua de cristal y conexiones*: Sirven para mostrar el nivel de agua en la caldera.
8. *Grifos de prueba del nivel de agua*: Sirven para comprobar el nivel de agua en la caldera; cuando debiera estar fuera de servicio temporalmente el nivel de vidrio.
9. *Válvula de drenaje bajo la columna de agua y dispositivo de corte de combustible por bajo nivel de agua*: Proporciona un medio para nivelar diariamente bajo la columna de agua y controlar el nivel de agua para mantener limpias la cámara y líneas de modo que el agua se controle y certifique con precisión en el cristal. También proporciona un medio de probar el dispositivo de corte por bajo nivel de agua.

* *N. del T.:* También conocido como «rabo de cerdo».

Instrumentación recomendada. Cualquier instalación se verá mejorada con el uso de instrumentos cuando el personal entrenado esté en condiciones de atender y hacer uso inteligente de los datos proporcionados. La instrumentación de las grandes calderas compactas debería incluir un aparato para obtener análisis de los gases de combustión y determinar el rendimiento de la combustión. Como mínimo, el código ASME de calderas recomienda para calderas de alta presión los siguientes instrumentos: 1) manómetro de presión de vapor; 2) manómetro de presión de la alimentación de agua; 3) manómetro del tiro de hogar; 4) manómetro de presión de salida del aire del ventilador de tiro forzado y de presión de ventilador de tiro inducido; 5) registrador de caudal de vapor para controlar la producción de caldera; 6) registrador de CO_2 para comprobar la combustión; 7) registrador de temperatura de entrada y salida del sobrecalentador; 8) registradores de temperatura de entrada y salida de los calentadores de aire; 9) termómetros indicadores de la temperatura de entrada y salida del vapor de los recalentadores de caldera; 10) registradores de la temperatura de agua de alimentación para comprobar el grado de desaireación y operación del economizador; 11) manómetros de presión sobre los pulverizadores para comprobar la presión diferencial para las mezclas aire-combustible de los quemadores; 12) manómetros de presión para las calderas calentadas por fuel-oil y/o gas-oil sobre las líneas de combustible a los quemadores y termómetros antes y después de los precalentadores de combustible; y 13) manómetros para las calderas calentadas a gas natural sobre las líneas principales de gas a los quemadores y sobre los quemadores individuales.

Presión y medición de la misma. *Presión* es la fuerza unitaria impuesta sobre una unidad de área por un fluido líquido o gaseoso; esta fuerza también actúa sobre las paredes de un recipiente. En unidades inglesas se expresa en libras por pulgada cuadrada, psi, y en unidades españolas, en kilogramos por centímetro cuadrado. *Presión manométrica* es la presión indicada en los manómetros que miden la presión interna de los recipientes sometidos a presión. Es una presión que está por encima de la presión atmosférica circundante y que actúa sobre el recipiente por su zona o parte exterior (la atmosférica). *Presión absoluta* es la suma de la presión manométrica y la atmosférica. A nivel del mar con la presión atmosférica normal es de 14,696 psi (1,02872 kg/cm^2; 1.029 milibares) o de 1 atmósfera. También se ha definido como la columna de 760 mm de altura (29,92 pulgadas) de mercurio a 32 °F (0 °C). En el trabajo de laboratorio, que requiere de precisión, debe usarse un barómetro de columna de mercurio para obtener la altura exacta y el peso a diferentes temperaturas, porque el peso de la columna de mercurio en un barómetro también da la presión por unidad de superficie de la sección. A 32 °F (0 °C) el mercurio pesa 0,49 libras/pulgada (13,6 gramos/cm^3). Así, cada pulgada de mercurio de altura ejerce una presión de 0,49 psi (0,034 kg/cm^2).

Las presiones por debajo de la presión absoluta se definen como condiciones de vacío y se miden normalmente en pulgadas (o en centímetros) de mercurio.

Ejemplo. ¿Cuál es la presión absoluta sobre un tanque de aire cuando el manómetro marca 148 psi (10,4 kg/cm^2) y el barómetro indica 29,45″ (74,8 cm) de mercurio?

Solución.

Presión atmosférica: 29,45 × 0,49 = 14,46 psi (1,012 kg/cm^2)

Presión absoluta: 148 + 14,46 = 162,46 psia (11'37 kg/cm^2) $\simeq$ 10,4 kg/cm^2 + 1,012 kg/cm^2

Ejemplo. Si el manómetro de vacío (vacuómetro) de un condensador marca 28,20″ de mercurio y el barómetro indica 29,58″ de mercurio, ¿cuál es la presión absoluta en el condensador?

Solución.

Presión absoluta (en pulgadas de mercurio): 29,58 – 28,20 = 1,38″ de Hg (3,5 cm de Hg).

Por tanto:

Presión = 1,38 × 0,491 = 0,678 psia (0,0475 kg/cm^2)

O bien:

3,5 cm de Hg × 13,62 grs/cm^2 = 47,67 grs/cm^2 = 0'0476 kg/cm^2

Los dos tipos principales de manómetros son el de tubo *Bourdon* y el de diafragma. La Figura 10.2*a* muestra el mecanismo interior del manómetro tubular de Bourdon sin el dial. El tubo curvado de sección ovalada está cerrado en un extremo y conectado por el otro a la presión de la caldera. El extremo cerrado está conectado mediante bieletas y ejes a un sector dentado, el cual a su vez mueve un pequeño piñón solidario con la aguja indicadora central. A medida que la presión aumenta en el interior del tubo oval, este tubo curvado intenta asumir la sección circular y tiende por ello a enderezarse longitudinalmente de su curvatura. Esta acción gira la aguja a través de las bieletas de unión que mueven el engranaje, produciendo el giro de la aguja indicadora y señalando así la presión en el dial graduación.

Requerimientos del Código sobre manómetros. La caldera debe tener al menos un manómetro de presión de un tamaño tal que sea fácilmente legible y que en todo momento indique la presión de la caldera. Una válvula o grifo debe colocarse en la conexión del manómetro a la caldera (Figura 10.2*b*) de modo que se pueda desconectar el manómetro y proceder a su reparación y/o sustitución. El manómetro debe estar conectado a la cámara de vapor, a la columna de agua o a su sistema de conexión al vapor. Para una caldera de vapor, el manómetro o su conexión debe tener un sifón para mantener un sello de agua* para evitar que el vapor entre en el tubo oval del manómetro. La conexión de un manómetro debe tener un mínimo de 1/4″ (6,4 milímetros) de diámetro interior.

Para temperaturas por encima de 406 °F (208 °C) no se deberá utilizar tubería de cobre ni de bronce. El dial del manómetro debería graduarse al doble del valor

---

* *N. del T.:* Cierre hidráulico.

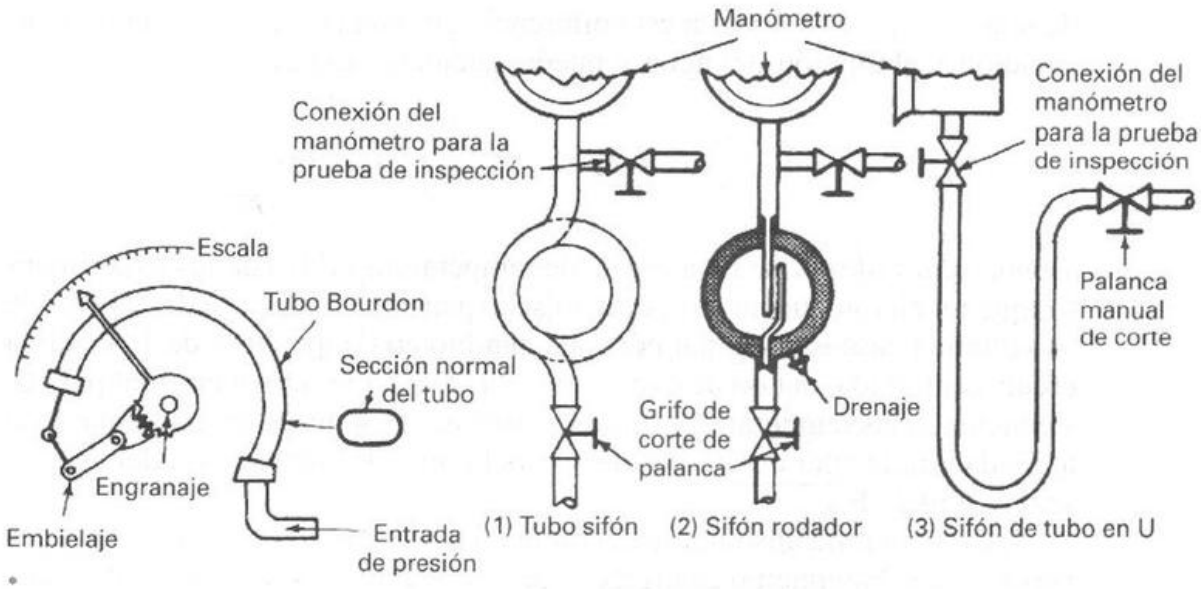


Figura 10.2. (*a*) Movimiento del manómetro de presión a vapor Bourdon. (*b*) Sifones utilizados en manómetros para protegerlos de la exposición directa al vapor a elevada temperatura.

ajustado en la válvula de seguridad, pero no a menos de 1,5 veces de ese valor de ajuste. Deberá instalarse en la caldera una válvula de conexión de al menos 1/4" de calibre de tubería, con el exclusivo propósito de conectar un manómetro de prueba o inspección para, cuando la caldera esté trabajando, poder comprobar la precisión del manómetro de caldera. Esta conexión o accesorio se conoce como conexión de inspección. El manómetro de la caldera debe estar iluminado y libre de todo reflejo o resplandor que pueda de alguna manera obstruir la visión del operario mientras esté viendo la indicación de presión. La aguja del manómetro deberá estar en posición vertical cuando indique la presión de trabajo normal. Esto atañe también a los demás manómetros de la sala de calderas que se utilizan como auxiliares. Los manómetros no deben estar inclinados hacia adelante y hacia abajo más de 30° de su vertical y ello sólo cuando sea necesario para una visión adecuada de la graduación del dial.

El sifón es simplemente un rabo de cerdo o lazo en la tubería del manómetro para condensar el vapor y así proteger el resorte y otras piezas delicadas de las altas temperaturas. En la Figura 10.2*b* se muestran tres modos o formas de hacerlo. Si hay peligro de heladas durante largas temporadas de corte o paro de actividades, el sifón debe eliminarse o purgarse.

Temperatura y escalas. La temperatura puede clasificarse en tres escalas:

1. *Farenheit:* En esta escala el punto de solidificación del agua es 32 °F y el punto de ebullición es 212 °F a la presión atmosférica. Como puede verse esto proporciona un abanico de 180° en la escala.
2. *Centígrado:* El sistema métrico decimal utiliza esta escala, con 100° de abanico entre el punto de congelación y el de ebullición del agua. La conversión

de una escala a otra implica esta diferencia en toda la separación entre congelación y ebullición del agua y puede calcularse usando:

$$°F = \frac{9}{5}\,°C + 32 \qquad °C = \frac{5}{9}\,(°F - 32)$$

3. *Temperatura absoluta:* Esta escala de temperatura deriva de los experimentos que revelaron que un gas perfecto se expansiona a una tasa de 1/491,7 de su volumen gaseoso original por cada cambio en temperatura de 1 °F. En la escala centígrada, la tasa de expansión es 1/273 del volumen original por °C. Reduciendo las temperaturas de varias sustancias se ha establecido que toda actividad molecular cesará por debajo del punto de congelación del agua, o sea a –459,7 °F.

   La temperatura absoluta se denomina del «cero absoluto». Así, para convertir grados Farenheit o centígrados de temperatura a temperatura absoluta, use las siguientes ecuaciones: La temperatura absoluta en grados Farenheit es:

$$°F_a = °F + 459{,}7$$

La temperatura absoluta en grados centígrados es:

$$°C_a = °C + 273$$

Ejemplo. Cuál es la temperatura absoluta de una sustancia a –10 °F.

Solución.

$$°F_s = -10 + 459{,}7 = 449{,}7\ °F_a$$

La división de los dispositivos de medida de temperatura es en dispositivos mecánicos (termómetros bimetálicos y con relleno de líquido, tipo termómetro) y electrónicos (detectores de temperatura por resistencia, o RTD; termopares; termistores; semiconductores e instrumentos tipo infrarrojos sin contacto físico). Los dispositivos mecánicos de medida de temperatura son buenos para mostrar temperatura, pero no pueden transmitir señales y por ello no se utilizan con los sistemas de control electrónicos o digitales. Véase la Figura 10.3*a* para ver los rangos de trabajo de temperatura de los dispositivos de medida de temperatura. Esta figura también muestra un termómetro bimetálico (Fig. 10.3*b*) y un termómetro del sistema de relleno con líquido (Fig. 10.3*c*).

DISPOSITIVOS MECÁNICOS DE TEMPERATURA

Termómetros bimetálicos. Si se calienta una tira de metal compuesto por dos metales distintos soldados o remachados conjuntamente, se dobla en la dirección del

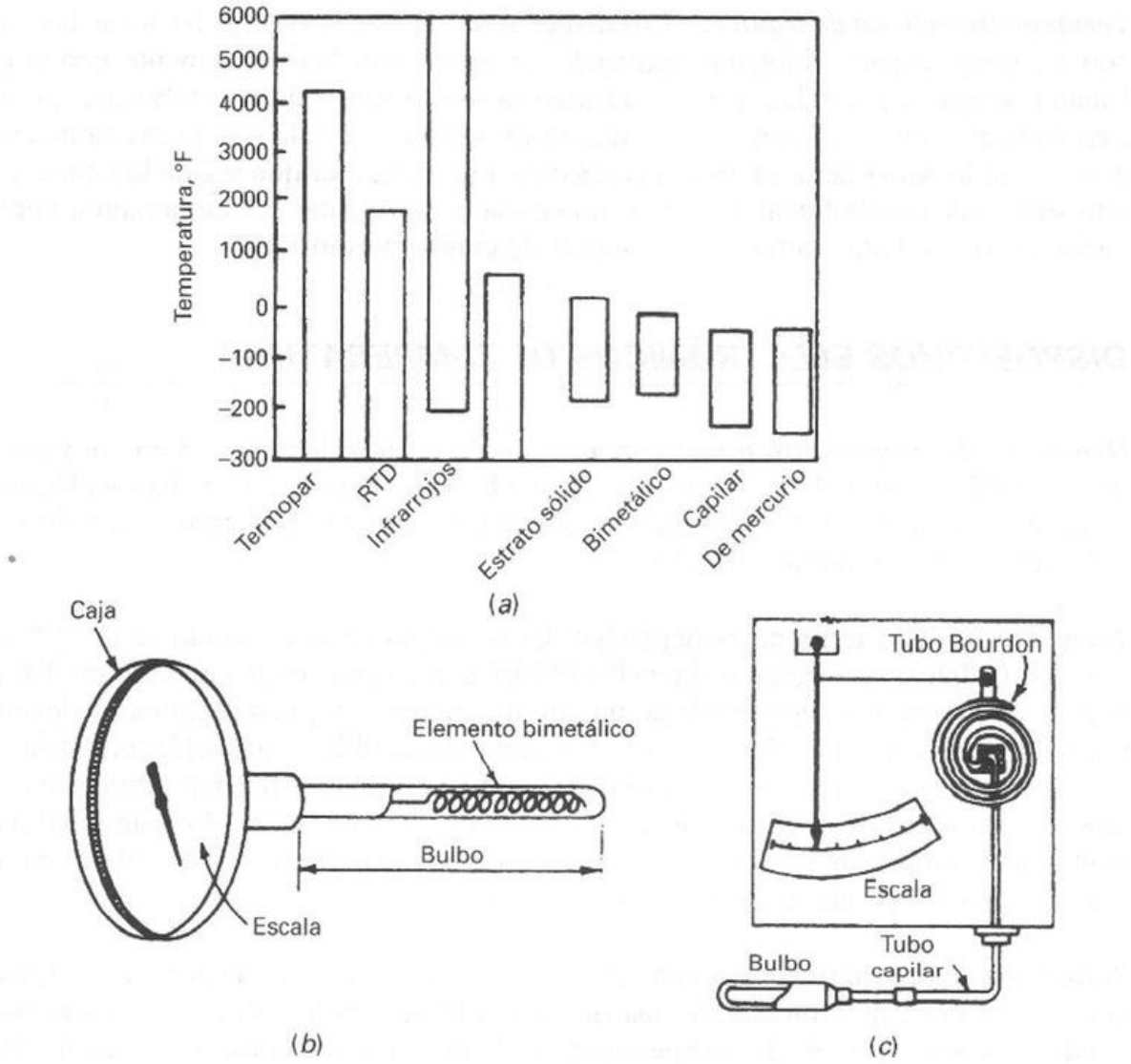


Figura 10.3. Medida de temperatura. (*a*) Límites de temperatura para diferentes sensores de temperatura. (*b*) Termómetro bimetálico. (*c*) Termómetro de gas o líquido. (*Cortesía de Power magazine.*)

metal con menor coeficiente de dilatación. La cantidad de flexión o combadura para una temperatura dada es repetible y puede utilizarse para indicar la temperatura, supuesto que se controla la pureza de los dos metales. Normalmente, la tira o banda está conformada o arrollada en espiral, y se une a una aguja fijada en un final de la cinta. El otro final es un punto fijo. A medida que la cinta dilata y se expande, la aguda indicadora señala la temperatura en una escala (Fig. 10.3*b*).

Los termómetros bimetálicos son baratos y de una precisión moderada: normalmente de un 1 por 100 del final de escala para los modelos industriales. El límite superior de temperatura está alrededor de 1.000 °F (540 °C), pero normalmente el límite usual es de 260 °C (500 °F). A causa de la disposición de la escala es difícil de obtener una buena resolución, excepto para termómetros de rangos estrechos. En los modelos industriales los elementos están normalmente cerrados en un tubo, ya que en caso contrario, la corrosión puede degradar la cinta metálica.

Termómetro relleno de líquido. Los dispositivos de este tipo (Fig. 10.3*c*) se hacen con un gas o líquido dilatable encerrado en un recinto herméticamente cerrado. Cuando se aplica calor, la presión del fluido expansionado induce al tubo en espiral a enderezarse, moviendo una aguja indicadora sobre una escala fija. Otras variantes usan el fluido para operar un pistón conectado a un indicador que señala la temperatura sobre una escala lineal. Este tipo no se usa para medidas de temperatura, pero puede utilizarse para operar un interruptor de control termostático.

DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS DE TEMPERATURA

Detectores de temperatura o resistencia. Los detectores de temperatura por resistencia (o RTD) operan bajo el principio de que la resistencia de un conductor eléctrico cambia o varía con la temperatura. Se utiliza normalmente el platino a causa de su estabilidad a temperaturas elevadas.

Termopares. Los termopares dependen del principio de que cuando se unen dos metales distintos, se generan una tensión eléctrica que varía con la temperatura. Esta tensión puede medirse con ayuda de un circuito electrónico. Los termopares tienen una soldadura o «punto caliente», que es el punto de medida, y una soldadura «fría», que es el punto de referencia. Los sensores de los termopares pueden fabricarse en una gran variedad de configuraciónes y tamaños y son muy utilizados para medida continua de temperatura de corrientes calientes. Son muy utilizados en calderas para controlar las temperaturas de los fluidos circulantes.

Termistores. Los termistores son resistencias que varían su resistencia eléctrica con los cambios de temperatura, así que son similares a los RTD. Esta cualidad puede utilizarse para medir temperaturas con un circuito eléctrico apropiado. El escaso avance de los termistores en comparación con los RTD y los termopares es debido a su más reducido campo operativo y al hecho de que el cambio de resistencia con la temperatura no es lineal.

DESARROLLO DE LA INSTRUMENTACIÓN

Se ha experimentado un tremendo desarrollo en la utilización de sensores e instrumentación en las salas de calderas con el objetivo de mejorar el control y el funcionamiento automático y eficiente de las mismas. Entre los parámetros medidos y comprobados en las centrales están: pH, conductividad, oxígeno disuelto en agua, sílice, hidracina y el ión sodio con el fin de controlar la calidad de agua de la caldera. Cada circuito o bucle del sistema de caldera tiene sus propios sensores, instrumentación y necesidades de control. Un ejemplo es el analizador de gases de chimenea para control de emisiones, mostrado en la Figura 10.4*a* de la página 360. Estos instrumentos miden CO, CO_2, SO_2 y NO_x. Con estas lecturas pueden efectuarse ajustes sobre la relación aire/combustible y otros ajustes si son necesarios para llevar los valores a los puntos de consigna de diseño.

Entre las magnitudes más controladas estan el pH y la conductividad del agua. Éstas se miden ahora en puntos apropiados de la planta de calderas en base continua como resultado del desarrollo de la industria de instrumentación y sensores. La *conductividad* se utiliza para detectar el contenido de sólidos o sales en una disolución o agua de caldera, y el instrumento se basa en determinar la corriente eléctrica a través de los puntos o zonas de ajuste y relacionarla con el contenido de sólidos o sales de la solución. Véase la Figura 10.4*b* de la página siguiente.

El *pH* de una solución es la medida de la concentración de iones de hidrógeno, y está relacionada con la acidez o alcalinidad de la solución, siendo siete el valor del punto neutro en una escala de 0 a 14. Los valores por debajo de 7 indican unas condiciones de acidez, mientras los valores por encima son alcalinos. Véase la Figura 10.4*c*. El instrumento está basado en el potencial electromecánico en la superficie de electrodos de vidrio*. Las lecturas se usan para analizar los resultados del tratamiento del agua.

El crecimiento de la instrumentación y control ha sido acelerado también por la evolución de la tecnología de los semiconductores o tecnología de los «chips» de ordenador, corrientemente conocidos como microprocesadores. Este crecimiento de los microprocesadores ha dado como resultado el incremento de la instrumentación avanzada y de los controles de acompañamiento para alcanzar y conseguir el funcionamiento automático, y también obtener las siguientes ventajas:

1. Mediante los procesos de arranque y parada por ordenador, el equipo de potencia de la planta puede ponerse en marcha y pararse más rápidamente.
2. Por la lógica de datos y tendencias de las lecturas, es posible la detección de mal funcionamiento y el operario puede realizar acciones correctoras.
3. Mediante un ajuste más cerrado de los límites de trabajo con respecto a los de diseño, puede conseguirse una mayor eficiencia o rendimiento térmico.
4. Puede mejorarse el control de las emisiones con un control más estrecho de las relaciones aire/combustible y de otros factores que controlan la combustión.

Reconocida esta tendencia hacia un funcionamiento más automático, ello reduce el seguimiento de personal de control en centrales térmicas y plantas de generación. Así, el nivel de preparación debe aumentar a medida que se necesita menos personal en una planta moderna. Los operarios deben estudiar las muchas características de automatismo que están siendo incorporadas a la instrumentación y control de una planta de calderas moderna.

Sin embargo, hay ciertos requisitos del Código sobre válvulas, conexiones y accesorios de seguridad que todavía son exigidos por las autoridades para mantener la buena marcha por razones de seguridad.

Calibrado y control de la instrumentación. El incremento en instrumentación y controles exige ahora a los técnicos probar y calibrar periódicamente la instrumentación sobre una norma de referencia que permita situar las desviaciones permisibles establecidas como guía para el rango de calibración. Normalmente se graban placas

* *N. del T.:* Potencial de electrodo.

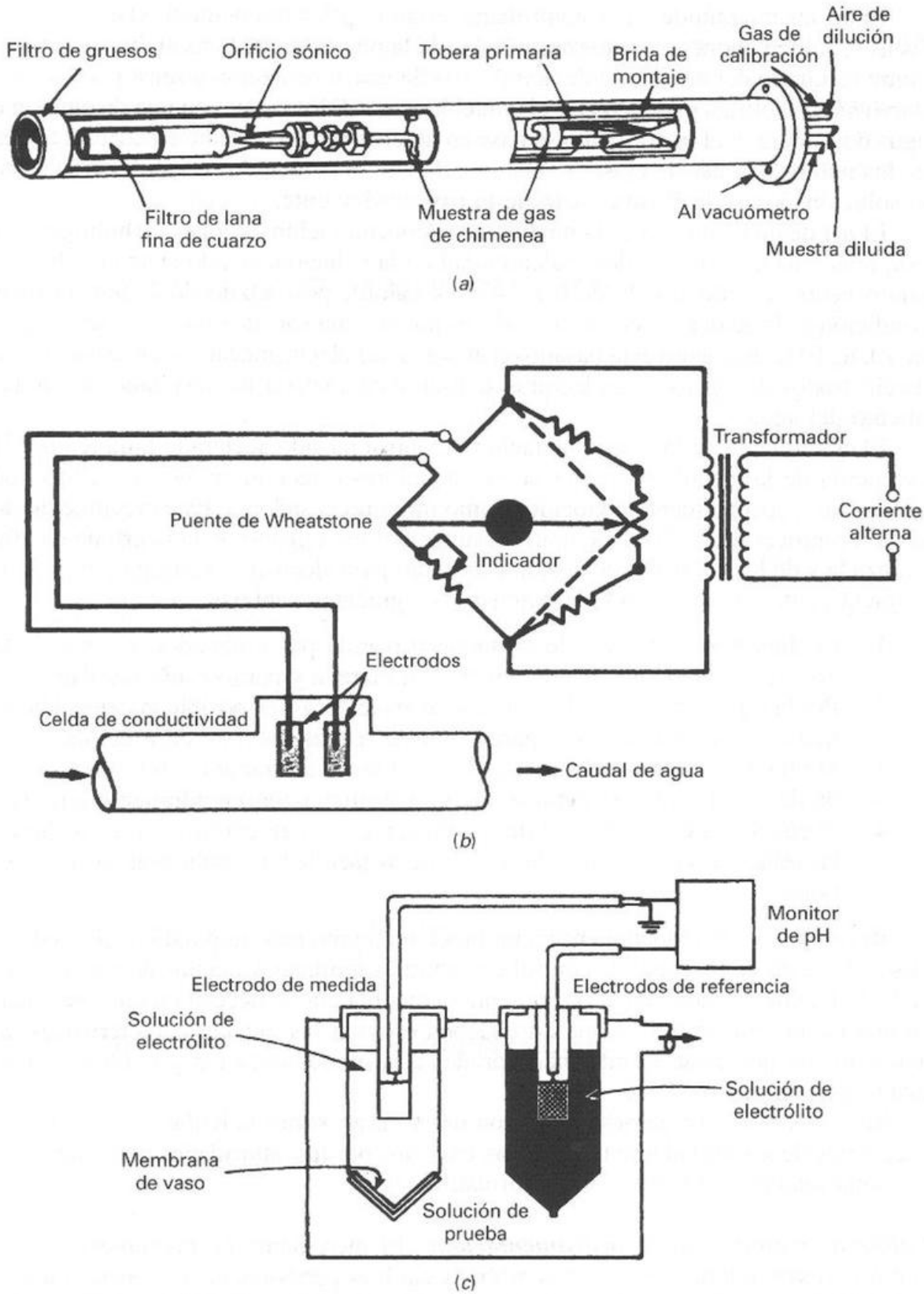


Figura 10.4. (*a*) Probeta de muestreo en chimenea para tomar y acondicionar CO, CO_2, SO_2 y NO_x de las fases de escape de chimenea. Éstos son transportados a los analizadores remotos y cuadros de control. (*b*) Circuito eléctrico para medida de la conductividad eléctrica de las soluciones con sales y sólidos disueltos. (*c*) Monitor de pH.

para mostrar la fecha de recalibración y la próxima fecha en que se debe volver a hacerlo. Las plantas grandes tienen personal especializado en calibrado de instrumentos, mientras que las menores, con menos instrumentación, pueden esperar que un operario de las organizaciones de servicio de instrumentación desarrolle esta tarea especializada o la realice con ayuda de los servicios de las marcas de los aparatos e instrumentos.

COLUMNAS DE AGUA, NIVELES DE CRISTAL Y GRIFOS DE MANÓMETROS

El nivel de vidrio y los grifos de nivel y manómetros son accesorios esenciales del Código para indicar el nivel de agua de la caldera. La columna de agua (a menudo omitida en la práctica marina y ferroviaria) está instalada entre el nivel de vidrio y la caldera. Sirve para eliminar las fluctuaciones excesivas en la indicación de nivel de agua en el vidrio debido a la rápida circulación en caldera o a la ebullición, y así actúa como un medio de relajación. Véanse las Figuras 10.5*a*, *b* y *c* de la página siguiente.

A veces se usan espejos, a causa de que la altura excesiva del calderín de la caldera no permite ver bien los niveles desde el suelo. Otros tipos de niveles de vidrio hacen uso de los indicadores de nivel remoto que pueden situarse a nivel del suelo (nivel de trabajo).

Las conexiones del nivel de vidrio entre el nivel y la columna de agua (o caldera si se omite la columna) deberían ser, al menos, de 1/2″ (13 mm) y debería situarse una válvula o grifo de drenaje en la parte inferior de la conexión inferior de la cámara. Se instalan válvulas de corte en ambas conexiones para permitir la sustitución de un cristal defectuoso cuando la caldera esté bajo presión.

Los grifos de nivel están situados para servir de control sobre la presión del nivel de vidrio y determinar el nivel de agua en la eventualidad de un fallo del vidrio. Si se instalan dos niveles independientes a la misma altura y separados al menos dos pies (0,6 m), los grifos de nivel se suelen colocar con el nivel. La mayoría de las normativas no exigen dos niveles excepto para calderas de locomotora de diámetro inferior a 36″ (914 mm) o en calderas de hogar interior dentro del ramo de los 5 hp. Las calderas mayores llevan conectados tres grifos de nivel. Éstos pueden montarse sobre la columna de agua o directamente en la caldera y están espaciados por igual dentro del espacio visible del nivel de vidrio.

El material de la columna de agua es normalmente fundición hasta 250 psi (17,5 kg/cm^2). El código ASME especifica que el hierro maleable puede utilizarse hasta 350 psi (24,5 kg/cm^2) pero se requiere acero para presiones mayores. Las tuberías de conexión de la columna de agua a la caldera deberían ser, al menos, de 1″ (25,4 mm) de diámetro. El tubo de cobre para conexiones inferiores es lo más utilizado hasta aproximadamente 150 psi (10,5 kg/cm^2). Cuando se precisa una curva o codo en la conexión inferior, se utilizan los manguitos en cruz a noventa grados en vez de los codos a noventa grados. Los dos orificios que no se utilizan deberán ser tapados con machones y éstos deberán desmontarse en cada revisión o inspección anual del interior (más de una si es preciso) para ver los tubos de unión y limpiarse si es necesario.

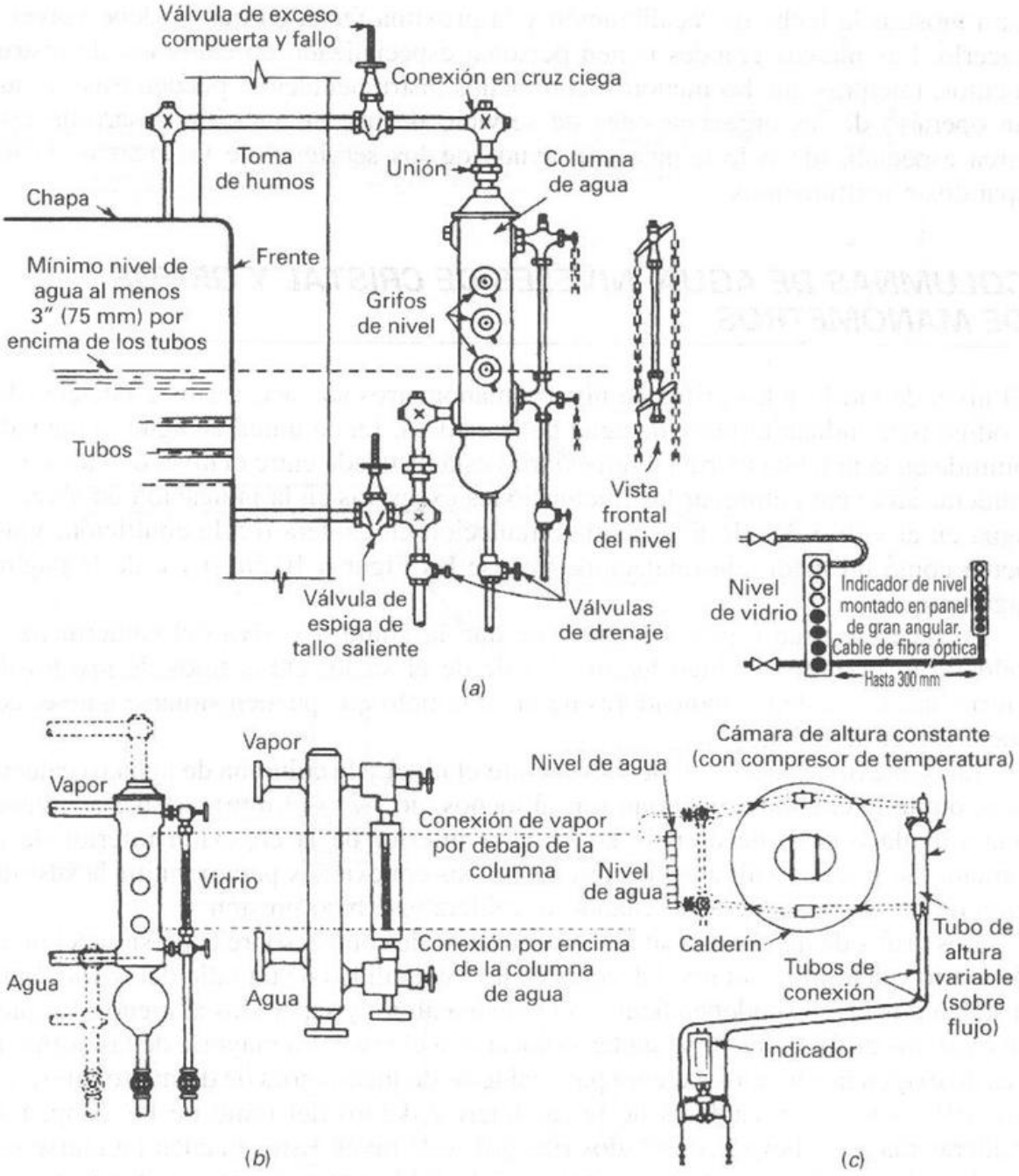


Figura 10.5. (*a*) Columna de agua y nivel de cristal conectados a una antigua caldera de tubos de humos, con válvulas de sobrenivel y fallo que debe sellarse o cerrarse cuando la caldera está trabajando. (*b*) La conexión de la columna de agua tiene válvulas sólo para conexión del nivel. Nótese que se requiere una situación de parte alta y baja del nivel de vidiro. (*c*) Los indicadores de nivel remotos permiten al operador comprobar el nivel de agua fuera del lugar de situación de la conexión de la columna a la virola o calderín de la caldera.

Es necesario drenaje en la columna de agua tanto en la parte superior como en la inferior (sobre todo en la parte más baja de la inferior). Una válvula de drenaje de 3/4" (20 mm) o mayor y de compuerta se utiliza para eliminar los sedimentos. Debe-

rá usarse una válvula de esfera en el lado de no presión de la válvula de compuerta para mayor hermeticidad si se desea. La utilización de la válvula de compuerta permite el uso de un alambre para limpiar una válvula obstruida sin parar la caldera ni dejarla fuera de servicio.

La conexión de vapor debería tener inclinación hacia la columna y la conexión de agua hacia la caldera, de modo que una falsa indicación de nivel no se señale por medio del agua atrapada en la columna cuando el nivel de agua está declinando. Nivelar una columna de agua o un nivel de vidrio es importante. El punto más bajo visible en el nivel de vidrio debería estar, al menos, 2″ (50 mm) sobre el punto más alto de los tubos o chapa de la bóveda del hogar. Para las calderas de hogar horizontal interior y tubos de humos, eso está 3″ (75 mm) por encima del punto más elevado de los tubos de humos o de la chapa de la bóveda. Para calderas de locomotora por debajo de 36″ (914 mm) de diámetro, está a 2″ (50,4 mm) por encima del punto más elevado de la chapa de la bóveda del hogar, y para calderas de más de 36″ (914 mm) de diámetro, está a 3″ (75 mm). Para calderas verticales de tubos de humos (VT) del tipo de tubos sumergidos, está a 2″ (50 mm) por encima de la placa tubular superior. Para las calderas verticales del tipo seco, está a 1/3 de la altura de los tubos. En la mayoría de los tipos normales de calderas tubulares, está al menos 2″ (50 mm) por encima del nivel mínimo permisible de agua.

Como se especifica y determina por el fabricante de la caldera, las válvulas no son absolutamente esenciales en las conexiones de vapor y agua de la columna de agua (véase la Figura 10.5*b*) pero, si se utilizan, deben ser de tornillo y asiento cónico (véase la Figura 10.5*a*), válvulas de compuerta y palanca, grifos de corte con palanca u otro tipo de válvulas que ofrezcan un paso recto y libre y señalen la posición del mecanismo operativo tanto en posición abierta como cerrada. Cierre estas válvulas o grifos abiertos o compruebe que están precintadas o cerrados, como requiere el Código.

El nivel de agua del vidrio con sus válvulas de vapor, agua y drenaje está colocado sobre la columna de agua como se ha mostrado, y con el número requerido de grifos de nivel. Los reguladores de compuerta, reguladores de agua de alimentación, manómetros de vapor y otras piezas de aparatos, que no requieren o permiten el escape de cantidad apreciable de vapor o agua, deben conectarse a unas tuberías que van de la columna de agua a la caldera.

Calderas trabajando a 400 psi (28 kg/cm^2) y más. El código ASME sobre conexiones de niveles de vidrio para calderas de alta presión exige que cada caldera tenga, al menos, un nivel de agua de vidrio, excepto las calderas que trabajen a más de 400 psi (28 kg/cm^2), las cuales deben tener dos niveles de agua de vidrio conectados a una única columna de agua o directamente al calderín de la caldera. Para calderas de gran potencia con todas las válvulas de seguridad de los calderines ajustadas por encima de 400 psi (28 kg/cm^2), pueden utilizarse dos indicadores de nivel remotos independientes en vez de uno de los dos niveles de vidrio para indicación del nivel de agua en el calderín de la caldera. Cuando ambos indicadores de nivel remoto están funcionando con fiabilidad, uno de los niveles de agua de vidrio puede cerrarse, pero debe mantenerse en condiciones de servicio. Cuando la lectura directa del nivel de agua de vidrio no es fácilmente visible para el operario en su área de trabajo, deben suministrarse dos indicaciones indirectas fiables, bien por transmisión del nivel de vidrio o bien por medio de indicadores de nivel remotos.

La Figura 10.5*c* muestra un indicador de nivel remoto típico de alta presión. Se monta sobre el panel de instrumentación de la sala de calderas o en algún otro lugar conveniente para la visión del operario del nivel de agua. El indicador está conectado a los accesorios sobre el calderín de la caldera mediante dos pequeños tubos. Los cambios en el nivel de agua de la caldera producen el correspondiente cambio en la presión estática en uno de estos tubos; la altura estática en el otro tubo permanece constante. Las variaciones en la presión diferencial en el indicador causan movimientos de la manecilla del indicador que con precisión indica el nivel de agua. El indicador está operado por el agua de la misma caldera, utilizando la presión diferencial entre una altura constante de agua y la altura variable en el calderín de la caldera. Por medio de un mecanismo de diafragma operado, con el lado del diafragma conectado a los niveles alto y bajo por la conexión del tubo, el nivel de agua se muestra en una escala graduada sobre el instrumento.

Los desarrollos sobre indicadores remotos incluyen la utilización de visores de vidrio verde para el agua y rojos para el vapor, mostrando a través de puertas o puertas el nivel de agua. Por medio de cable de fibra óptica, la visualización remota es posible sobre el tipo de nivel con segundo orificio. La transmisión de más de 100 pies (300 m) es posible con cable de fibra óptica (véase la Figura 10.5*c*).

VÁLVULAS DE SEGURIDAD

La norma ANSI B95.1 tiene una gran lista de terminología relativa a válvulas de seguridad. Éste es el dispositivo de seguridad más importante sobre una caldera, y puede ser la última defensa contra una explosión por sobrepresión. Unas pocas definiciones sobre este importante dispositivo ayudarán a diferenciar los tipos que hay disponibles:

Un *dispositivo de alivio de presión* está diseñado para aliviar la presión o abrir para evitar una subida interna de presión de una vasija o recipiente cerrado con presión excesiva sobre la admisible de trabajo.

Una *válvula de alivio de presión* está actuada por la presión interior que tiene un ascenso graduado proporcional al incremento de presión y se utiliza principalmente para evitar sobrepresión en el servicio de líquidos.

Una *válvula de seguridad* es un dispositivo de alivio de presión actuado por la presión ajustada pero caracterizado por una acción de apertura rápida, para trabajar y rebajar presión inmediatamente, al dejar escapar vapor de un recipiente cerrado. Puede también utilizarse para servicio de alivio de la presión de aire.

Una *válvula de alivio de presión pilotada por presión* es un dispositivo de alivio donde el dispositivo principal está actuado y controlado por un «disparador» auxiliar auto-operado de la válvula de alivio de presión.

Hay muchos requerimientos en el Código sobre este importante dispositivo de seguridad.

Construcción de la válvula de seguridad. Es de suma importancia que una válvula de seguridad esté correctamente construida. Tal construcción puede asegurarse especificando que debe estar conforme al código ASME o National Board, aprobada y registrada, siendo su funcionamiento de disparo por muelle directo cargado a resor-

te, y adecuadamente marcada o calibrada tanto en posición como en caudal o capacidad de evacuación y equipada con una palanca de prueba. El ajuste de presión debe corresponder bien a la presión máxima admisible para la que se diseñó la caldera o, en calderas viejas, la máxima presión permitida por la ley del estado. La capacidad de la válvula de seguridad debería ser, al menos, igual al vapor máximo que puede generase por la caldera. Una válvula de seguridad según el código ASME lleva la siguiente información inscrita en el cuerpo de la válvula o placa nominativa (véase la Figura 10.6*a*):

- Nombre del fabricante o marca registrada comercial.
- Tipo de fabricante o número de diseño.

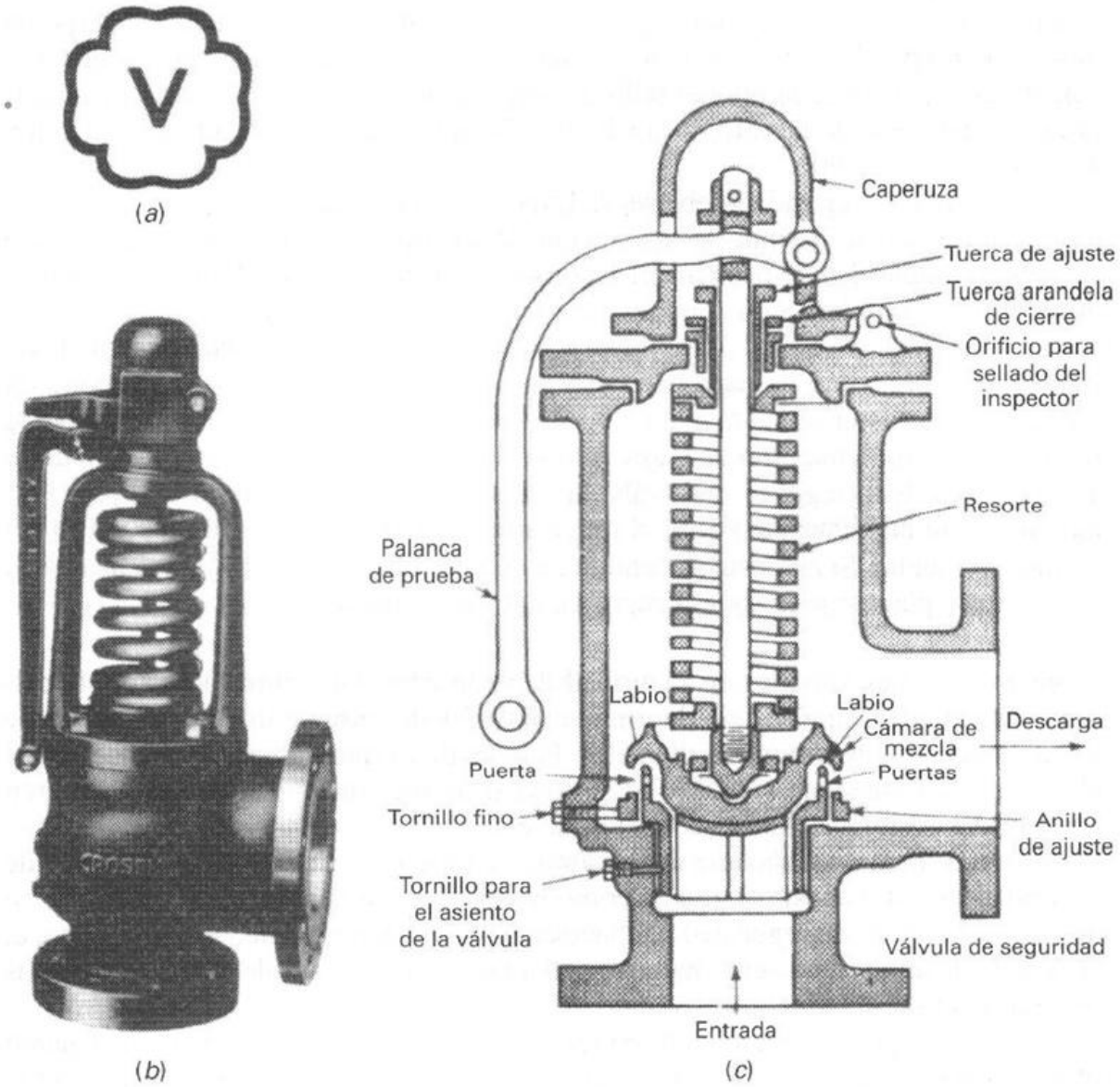


Figura 10.6. Válvulas de seguridad de disparo a resorte. (*a*) Símbolo ASME de válvula de seguridad aprobada (válida). (*b*) La válvula de seguridad para vapor sobrecalentado tiene el muelle expuesto. (*Cortesía de Válvula y manómetros Crosby.*) (*c*) La cámara de agrupación suministra espacio a la acción de disparo a la válvula de seguridad.

- Tamaño, pulgadas.
- Diámetro del asiento, pulgadas.
- Presión a la que la válvula está ajustada para disparar, psi o kg/cm^2.
- Venteo, psi o kg/cm^2.
- Capacidad de descarga, lb/hr o kg/hr.
- Capacidad de palanca, pulgadas o milímetros.
- Símbolo del código ASME (en Estados Unidos).

Cuando una válvula de seguridad lleva el sello de ASME o National Board, es la garantía del fabricante de que las reglas y normas del código ASME han sido cumplidas en la construcción del producto.

Brevemente, los requisitos constructivos más importantes son que el disco y el asiento sean de material anticorrosivo y que el asiento esté abrochado al cuerpo de modo que no pueda levantarse con el disco de la válvula. Todas las piezas deberán construirse de forma que ningún fallo de ninguna pieza pueda interferir o disminuir la capacidad plena de disparo de la válvula. El asiento debe estar inclinado en algún ángulo entre 45° y 90°.

La válvula de seguridad debe ser del tipo de resorte cargado directo. El Código establece que no se permite la instalación de los tipos de contrapeso y palanca o válvulas de seguridad de peso muerto, porque el ajuste de tales válvulas es demasiado fácil de manipular. Su uso no es recomendable en modo alguno.

La válvula de seguridad a resorte es normalmente de forma cilíndrica o cuadrada para tener un máximo de paso entre sus piezas (del resorte). Si el resorte entra en contacto en sus espiras, la válvula no puede hacer fuerza. Es por ello principalmente por lo que el rango máximo de ajuste permitido con resortes es del 10 por 100 de su ajuste tarado. Esta regla es para válvulas de seguridad taradas hasta 250 psi (17,5 kg/cm^2). Para presiones mayores, el rango admisible del ajuste es del 5 por 100 del tarado del muelle. Si el ajuste se cambia en una desviación mayor, deberá instalarse un resorte y placa nuevos por el representante del fabricante.

Conexiones. Las válvulas de seguridad deberán conectarse directamente a la caldera sin válvulas intermedias de ningún tipo. Pueden usarse uniones roscadas de hasta incluso 3″ (76,2 mm) de diámetro. Para calderas que trabajen a más de 15 psi (1,05 kg/cm^2) todas las válvulas de seguridad de más de 3″ de diámetro deberán tener bridas como sistema de conexión de entrada.

Es importante que la tobera de apertura a la tubería de descarga de la válvula de seguridad sea, al menos, tan grande como la conexión de la válvula de seguridad. Si dos o más válvulas de seguridad se conectan a una tubería común o acoplamiento, el área de la misma deberá ser al menos igual a las áreas sumadas de todas las válvulas de seguridad conectadas.

Una palanca de levantamiento se precisa para levantar o abrir la válvula dejando libre el asiento cuando exista un 75 por 100 de la presión de disparo en la caldera. No están permitidas las palancas que puedan bloquear la válvula en la posición levantada.

La presión de retrosoplado o presión de purga es el número de libras por pulgada cuadrada (kg/cm^2) de pérdida de carga o caída de la presión de caldera a partir del cual la válvula de seguridad se dispara hasta el punto en que vuelve a cerrarse. Para

presiones de hasta 100 psi (7 kg/cm^2) de la presión de disparo, la presión de retrosoplado no será mayor del 4 por 100 ni menor de dos libras (1 kg/cm^2). Las presiones mayores necesitan una retropresión del 2 por 100 de la presión de disparo. Las válvulas de seguridad utilizadas en calderas de circulación forzada del tipo de circuito único en serie pueden ajustarse para cerrar después de un retrosoplado no mayor del 10 por 100 de la presión de ajuste de las válvulas. Las válvulas para este uso especial deberán ser ajustadas y marcadas, y el ajuste de soplado deberá realizarse y contrastarse por el fabricante. Un soplado menor puede dar lugar a una acción destructiva por vibración (cierre y apertura rápida). Un soplado demasiado grande despilfarra vapor y combustible. Aunque el Código no dice nada respecto al soplado máximo, es una buena práctica ajustarse al mínimo permitido.

El código ASME especifica que el soplado debe ser ajustado y sellado por el fabricante o por su representante autorizado. El ajuste se efectúa mediante el anillo de soplado o de ajuste, en las válvulas del tipo mostrado en la Figura 10.6*c*. Se quita el tornillo de acceso al anillo de ajuste y, con una herramienta puntiaguda o destornillador, se gira el anillo parte de una vuelta de su rosca. Esto sube o baja el anillo cambiando el área de la cámara de mezcla.

La acción de la cámara de mezcla y del anillo de retrosoplado es exponer una mayor área al vapor de escape cuando la válvula abre ligeramente. La presión del vapor actuando sobre un área mayor proporciona una mayor presión total de levantamiento en contra del resorte, lo que da como resultado la apertura de la válvula con una descarga, por la acción de corte consiguiente del vapor (conocida como «ahogamiento del vapor») que se produce en la válvula y asiento por la lenta apertura que así puede eliminarse.

La tobera de salida tipo válvula *Crosby* (Figura 10.7 de la página siguiente) actúa según el principio del anillo de soplado. Cuando la válvula primero se eleva por el empuje, el vapor actúa sobre el anillo de ajuste y éste se flexiona hacia abajo. La reacción del caudal de vapor vertido obliga a la válvula a abrir de golpe. Este tipo de fabricación produce un empuje y una capacidad de descarga elevados.

Descarga de la válvula de seguridad. Deberán usarse tuberías de descarga si la descarga está situada donde los trabajadores pueden sufrir un escaldamiento por el vapor. Una tubería de descarga apropiada es tan esencial para la seguridad de los trabajadores de la planta como la válvula de seguridad lo es para la seguridad de la caldera. Muy a menudo un operario suele abrir una válvula de corte mientras la válvula de seguridad está descargando, sin tener tubería de descarga, y apuntando directamente al personal . Situarse en la trayectoria del chorro de vapor de escape de 3 ó 4″ (75 ó 100 mm) de diámetro, normalmente suele ser fatal.

Cada tubo de descarga debería tener al menos una altura de seis pies (1,8 m). Si el local imposibilita terminar el tubo de descarga dentro de una distancia del techo razonable y segura, deberá prolongarse fuera del tejado o de la pared limitante del edificio. Si se trata de un tejado plano donde debajo hay operarios, el tubo de descarga deberá prolongarse, al menos, seis pies (1,8 m) por encima. Si es más práctica una tubería de descarga horizontal, debería descargar sobre un lugar seguro.

Es esencial que el diámetro de la tubería de descarga sea, al menos, igual al de salida de la válvula de seguridad. Si se necesita una longitud de más de doce pies (3,6 m) es mejor utilizar un diámetro superior en 1/2″ por cada doce pies (3,6 m) de

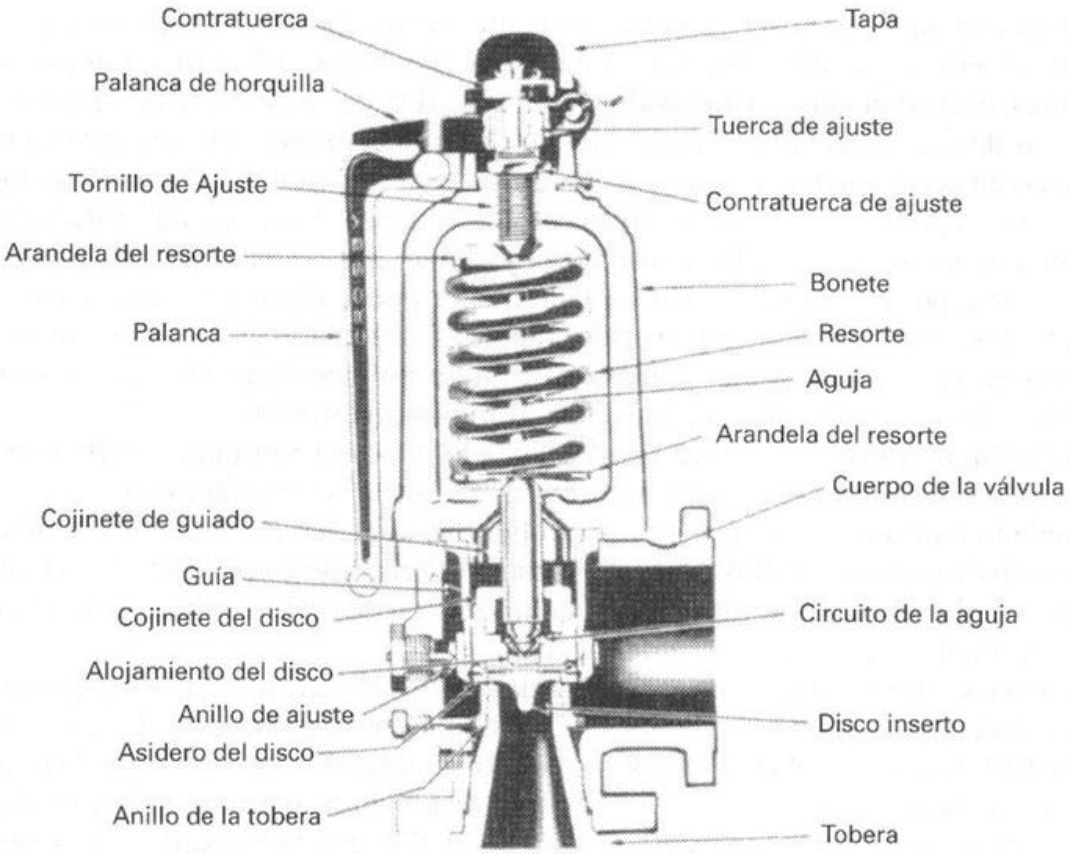


Figura 10.7. Vista en corte de una válvula de seguridad de guía superior, tipo de reacción total de la tobera para temperaturas de vapor hasta 1.200 °F (650 °C). (*Cortesía de Válvulas y manómetros Crosby.*)

longitud. Una línea más larga sin diámetro aumentado producirá un retroceso de presión por causa de la pérdida de carga por rozamiento en la estrecha tubería, y podría producir una vibración seria en la válvula de seguridad. Asimismo, todo codo o curva a 90° debería evitarse, si ello es posible.

La tubería de descarga debería soportarse independientemente de la válvula de seguridad. El peso de una tubería de descarga de vapor, si se hace trabajar sobre la brida de la válvula de seguridad, puede producir tensiones serias que se asentarán en la brida y cuerpo de la válvula de seguridad y en su conexión o brida, o incluso en la tobera y brida de unión de la válvula con la caldera.

Después de que una válvula de seguridad ha soplado muchas veces, no es inusual que se produzca una pequeña fuga o pérdida. La condensación de esta fuga puede llenar gradualmente una tubería de escape no drenada (con el agua de condensación). Esta condición puede provocar que la válvula no sople a su presión de tarado. El punto de descarga debe incrementarse 1 libra (0,45 kg) por cada 2 ó 3 pies (0,6 ó 0,9 m) de altura del agua en el tubo de descarga. También, en un tubo de descarga al exterior expuesto a temperaturas invernales severas, puede formarse hielo e interferir seriamente con la operación correcta y segura de la válvula de seguridad. Toda tubería de descarga debería tener un drenaje abierto de 3/8 ó 1/2″ (10 ó 13 mm) de diámetro en su punto más bajo. Este drenaje debería conducirse fuera de la parte

superior de la caldera para evitar corrosión exterior producida por la humedad. La Figura 10.8 muestra una válvula de seguridad instalada correctamente.

Capacidad de descarga. El número y la capacidad de las válvulas de seguridad requeridas en la caldera están regidos por el Cógido de calderas. Deben seguirse las siguientes reglas:

1. La capacidad o caudal de una válvula de seguridad de caldera debe ser tal que la válvula (o válvulas) de seguridad descargará todo el vapor que pueda generarse por la caldera (se supone que a la máxima capacidad de combustible) sin permitir que la presión suba más de un 6 por 100 por encima de la presión máxima a la que la válvula está tarada, y en ningún caso más del 6 por 100 por encima de la presión máxima admisible.
2. El fabricante de la caldera está obligado por el Código a estampar la placa y también a mostrar en la relación maestra de datos cuál es la capacidad máxima de diseño de vaporización de la caldera. Las antiguas reglas mínimas de las válvulas de seguridad basadas en la superficie calefactora y el combustible quemado, como se muestra en la Figura 10.9 de la página siguiente, están ahora colocadas en los párrafos del apéndice no obligatorio de la Sección I del código ASME y pueden usarse como guía de conducta si la placa o chapa no muestra la capacidad máxima, como ahora se estipula en el Código.

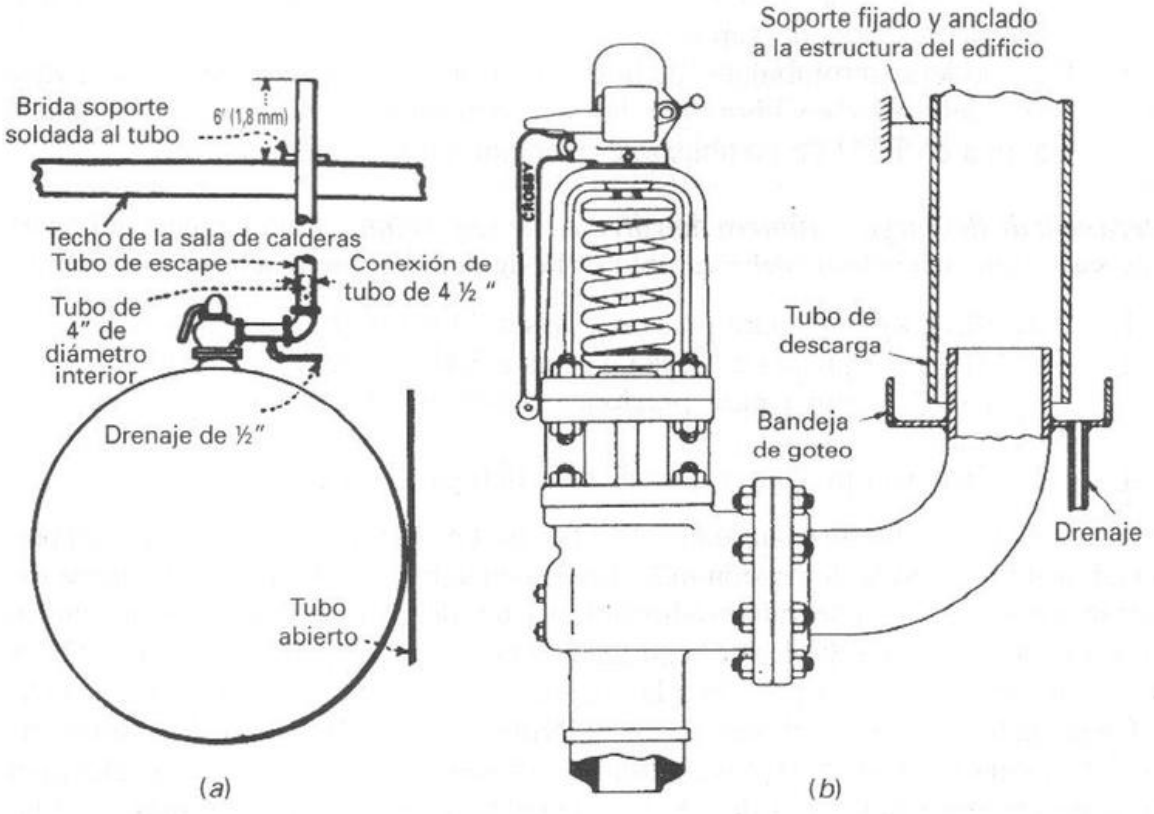


Figura 10.8. El tubo de descarga desde la válvula de seguridad debería tener un drenaje para eliminar el condensado. (*a*) Tubo de baja presión. (*b*) Tubo de alta presión.

Mínimo control de vapor por libras/horas por pie cuadrado de superficie en calderas

Superficie	Calderas pirotubulares	Calderas de tubos de agua
Superficie de calentamiento de caldera:		
Alimentada manualmente	5	6
Alimentada por alimentador mecánico	7	8
Combustible gaseoso, líquido o sólido pulverizado	8	10
Superficie calefactora de tubos de agua:		
Alimentada manualmente	8	8
Alimentada por alimentador mecánico	10	12
Combustible líquido, gaseoso y sólido pulverizado	14	16

NOTA: Cuando una caldera está alimentada solamente por un gas que tenga un poder calorífico que no exceda de 200 BTU/pie^3 (1867 kcal/m^3), la capacidad de la válvula de seguridad debe basarse en los valores dados para la caldera con alimentación manual del combustible en el cuadro anterior.

Figura 10.9. La vieja regla de determinar la capacidad de la válvula de seguridad por la superficie de calefacción y el combustible quemado ha sido reemplazada por el sello o placa del fabricante de la capacidad de la caldera grabada en la placa del nombre según los requisitos del Código. La tabla superior es ahora una guía para aquellas calderas que no tienen placa grabada con la máxima capacidad de salida.

3. Para calderas eléctricas, la capacidad de descarga se determina multiplicando la potencia en kilovatios por 3,5 para obtener las libras por hora de capacidad de descarga de vapor.
4. Para calderas pirotubulares de hogar interior, la capacidad requerida de descarga del vapor en libras por hora se determina dividiendo la capacidad máxima en BTU de combustible quemado en la caldera por mil.

Tolerancia de descarga y número de válvulas de seguridad. La tolerancia del punto de descarga que una válvula debe cumplir es la siguiente, sobre una base aproximada:

1. 2 psi (0,14 kg/cm^2) para presiones hasta 70 psi (4,9 kg/cm^2) inclusive.
2. 3 por 100 para presiones desde 71 hasta 300 psi (de 35 a 21 kg/cm^2).
3. 10 psi (0,7 kg/cm^2) para presiones desde 301 hasta 1.000 psi (de 21 a 70 kg/cm^2).
4. 1 por 100 para presiones de más de 1.000 psi (70 kg/cm^2).

Una o más válvulas de seguridad deben tararse en o por debajo de la máxima presión admisible. El ajuste de presión más alto de una válvula de seguridad no puede exceder la presión máxima de trabajo admisible en más del 3 por 100. El rango de ajustes de presión de todas las válvulas de seguridad de la caldera no puede exceder el 10 por 100 del ajuste de la mayor presión a la que cualquiera de las válvulas esté ajustada.

Cada caldera requiere, al menos, una válvula de seguridad, pero si la superficie de calefacción excede de 500 pies cuadrados (45 metros cuadrados) o si la caldera es eléctrica con potencia de más de 500 kW, la caldera debe tener dos o más válvulas de seguridad. Cuando hay montadas no más de dos válvulas de diferentes tamaños en la caldera, la más pequeña no deberá ser menor del 50 por 100 en capacidad de descarga de la mayor.

Válvulas de seguridad de sobrecalentadores. Las válvulas de seguridad que descargan vapor a más de 450 °F (232 °C) de los sobrecalentadores deberán tener una conexión de entrada embridada o soldada en todos sus diámetros (tamaños). Estas válvulas deberán construirse en acero o aleación de acero adecuada para resistir el calor a las máximas temperaturas del vapor. El resorte o muelle en las válvulas de seguridad del sobrecalentador deberá estar totalmente resguardado (Fig. 10.6*b*) de modo que no esté en contacto con el vapor a temperaturas elevadas.

Cada sobrecalentador conectado a una caldera sin interposición de válvulas entre sobrecalentador y caldera, requiere una o más válvulas de seguridad en el colector de salida del sobrecalentador. Sin interposición de válvulas de corte entre el sobrecalentador y la caldera, la capacidad de las válvulas de seguridad sobre el sobrecalentador debe ser incluida en la capacidad total requerida para la caldera, supuesto que la capacidad de la válvula de seguridad en la caldera es, al menos, del 75 por 100 de la capacidad agregada de la válvula de seguridad requerida para la caldera.

Las válvulas de seguridad del sobrecalentador deberán estar siempre ajustadas a una presión menor que las válvulas de seguridad del calderín, de modo que se asegure el flujo de vapor a través del recalentador en cualquier circunstancia. Si las válvulas del calderín de seguridad soplan primero, el recalentador puede verse privado del vapor refrigerador, siendo posible el sobrecalentamiento y la rotura del tubo.

Prueba de válvulas de seguridad. La corrosión y los depósitos en la válvula y su asiento se producen porque la válvula de seguridad no se ha levantado durante un largo período de tiempo. Para evitar esta situación, más peligrosa en calderas automáticas (especialmente de baja presión), la válvula de seguridad debería actuase periódicamente usando la palanca manual o preferiblemente por elevación de la presión del vapor hasta el punto de disparo. Esta última práctica debería realizarse solamente con una atención constante de la caldera y bajo supervisión de personal experto que vigilará cuidadosamente la presión y cortará inmediatamente la caldera si esta presión comienza a exceder la máxima admisible. Las pruebas de palanca de las válvulas de seguridad deberían hacerse con, al menos, el 75% de la presión de la caldera actuando sobre la válvula de seguridad.

Otros problemas que pueden encontrarse en las válvulas de seguridad, además de la corrosión y los depósitos, incluyen superficies dañadas por la corrosión de los asientos, partículas extrañas (óxido y depósitos calcáreos) y soldaduras atacadas, obstrucciones en la tubería que va desde la válvula de seguridad, produciendo chirridos, mientras que las obstrucciones en el lado de la descarga producen el cegado esporádico y/o pérdidas de la válvula de seguridad, así como un soplado y purga adecuados como consecuencia del mal ajuste del anillo de purga que puede también producir vibraciones. Otros defectos más notorios son una rotura o corrosión del resorte y ajustes demasiado próximos a la presión de diseño de trabajo.

Reparaciones de las válvulas de seguridad. La NB tiene ahora un procedimiento para calificar a los reparadores de válvulas de seguridad y conceder el sello «VR» a las organizaciones cualificadas. El procedimiento requiere el mantenimiento de un programa de control de calidad por la organización reparadora y también la demostración de la capacidad de reparación a satisfacción del representante de la NB. Esto incluye la aceptación de la prueba por un laboratorio aprobado para demostrar que

las válvulas reparadas cumplen los criterios operativos y funcionales (ajuste de presión y capacidad) como se estipula en la sección correspondiente del código ASME de calderas. Las válvulas reparadas deben tener una placa mostrando el símbolo NB de una reparación «VR», como se ve en la Figura 10.10. Muchas administraciones o jurisdicciones exigen que las válvulas de seguridad sean reparadas solamente por los poseedores del sello NB de calificación «VR»; además, para cumplir con los requisitos jurisdiccionales, los operarios de una planta de calderas deberían comprobar con los inspectores de jurisdicción toda reparación de la válvula de seguridad. Información adicional concerniente al sello «VR» de la NB para válvulas de seguridad puede obtenerse contactando con The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors (1055 Crupper Ave. Columbus OH, 43229. (614)888-8320) para EE. UU., en las Delegaciones de Industria de las comunidades autónomas en España y/o consultando el libro: «Reglamento de aparatos a presión e instrucciones técnicas complementarias» del MINER (Centro de publicaciones: Doctor Fleming 7, 28036 Madrid).

Válvulas y tuberías. Las válvulas en las calderas, como se ve en la Figura 10.1, comprenden válvulas de vapor en los colectores principales; válvulas de alimentación en la alimentación de agua de la caldera; válvulas de drenaje en las columnas de agua, niveles de vidrio y conexiones de drenaje; válvulas de purga para las purgas superficial y de fondo (sedimentos); válvulas de comprobación en las líneas de alimentación; y válvulas de antirretorno en los colectores y líneas de vapor. Los materiales para la tubería de las centrales térmicas son principalmente de acero al carbono o aceros inoxidables. En las aplicaciones nucleares deben considerarse en el diseño de tuberías los cambios de propiedades metálicas como resultado de la radiación. Los factores que afectan a los tubos de las centrales térmicas incluyen regímenes y trastornos transitorios térmicos debidos a los cambios rápidos de temperatura causados por problemas de operación, golpes de ariete debidos al agua atrapada en los tubos, vibración y agrietamiento a partir de la maquinaria conectada que requiere una atención muy seguida y próxima para el equilibrado de la maquinaria rotatoria (turbinas y alternadores). Las vibraciones sísmicas de gran amplitud y baja frecuen-

Figura 10.10. Muestra de la placa y símbolo «VR» del National Board placa y símbolo de que la válvula de seguridad ha sido reparada por una organización autorizada por NB.

cia deben tenerse en cuenta en el diseño de plantas nucleares. La Figura 10.11 muestra algunos sistemas de soporte de tuberías.

Cada salida o descarga de vapor principal o secundaria, excepto la válvula de seguridad y conexiones del sobrecalentador, debe tener una válvula de corte conectada tan cerca de la caldera como sea posible. Cuando el diámetro de salida es de más de 2″ (diámetro del tubo), la válvula debe ser del tipo compuerta y husillo (O S & Y) para indicar por la posición de la espiga roscada si la válvula está abierta o cerrada. Cuando dos o más calderas están conectadas a un colector principal común de vapor, la conexión de vapor de cada caldera que tenga agujero de hombre debe tener dos válvulas de corte en serie, con un drenaje amplio de soplado libre entre ellas. La descarga del drenaje debe estar bien a la vista del operario cuando abre o cierra las válvulas. Ambas válvulas pueden ser del tipo O S & Y, pero una debería ser una válvula automática antirretorno. Esta debería estar colocada cerca de la caldera, de modo que pueda ser examinada y ajustada o reparada cuando la caldera esté desconectada de la línea de vapor. Los conectores o tuberías principales de vapor que van a la planta desde la caldera deberían estar adecuadamente soportados.

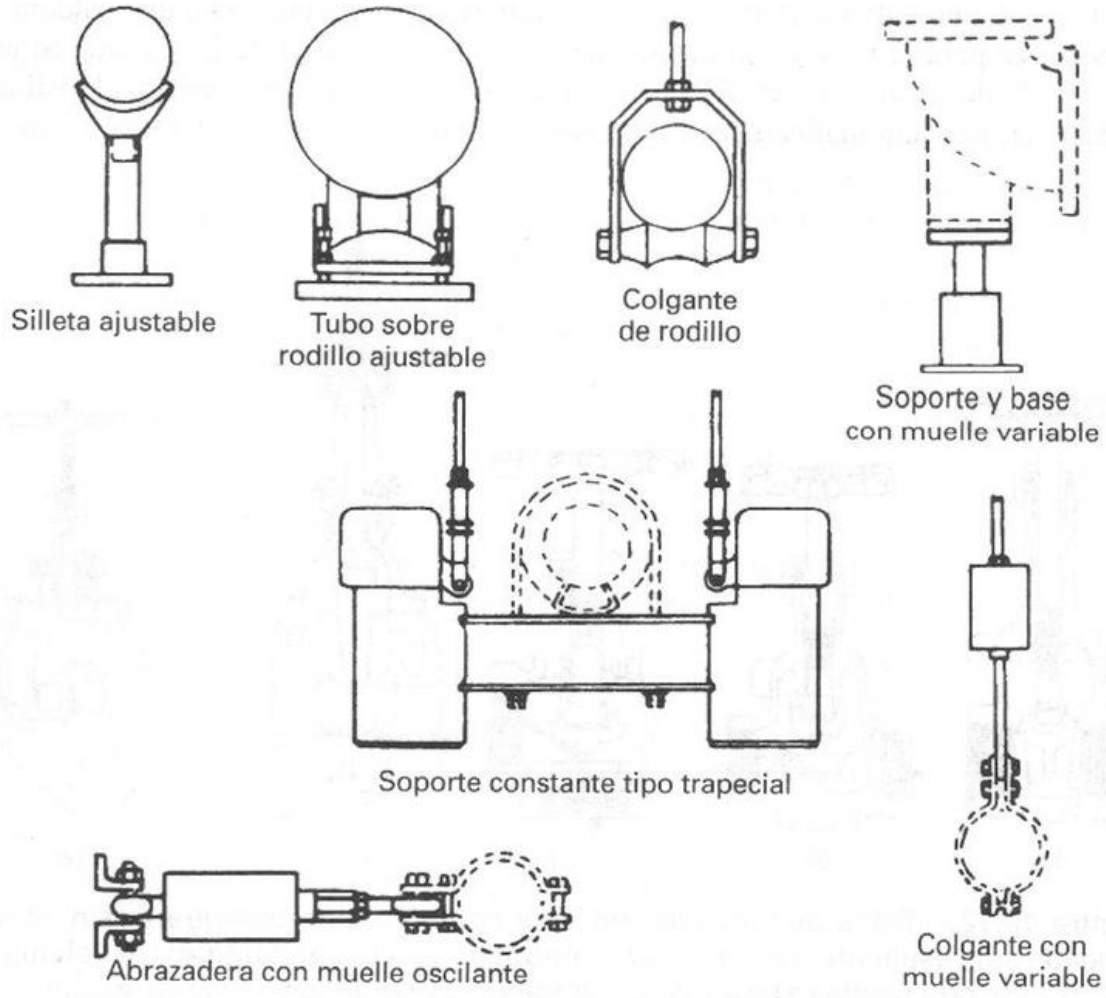


Figura 10.11. Métodos de soporte de tuberías de plantas térmicas.

Una *válvula antirretorno* (Fig. 10.12*e*) se utiliza a veces como válvula de corte en la línea principal de vapor próxima a la caldera de vapor. La función de las válvulas de corte y comprobación o válvulas antirretorno, como frecuentemente son conocidas, es tan importante como la de las válvulas de seguridad de disparo en las calderas donde dos o más unidades están conectadas al mismo colector. Automáticamente evitan el retroceso desde el colector, lo que provocaría un fallo de caldera. Simplifican el trabajo de cortar una caldera o ponerla en funcionamiento. Protegen a los equipos de reparación o inspección de la caldera contra un retroceso del vapor en el caso de que la válvula de corte del colector estuviese accidentalmente abierta. Ninguna planta multicaldera debería estar sin la presencia de estas válvulas. Están disponibles en modelos de paso recto, modelos en ángulo y de globo, dependiendo de la presión de trabajo.

Varios tipos de válvulas se muestran en la Figura 10.12. Como norma, la válvula de globo (Fig. 10.12*b*) se usa cuando se desea una estanqueidad positiva contra fugas y donde el fluido controlado está prácticamente libre de sólidos en suspensión. Debería notarse en la figura que ambas, la válvula de disco (compuerta) y la de asiento, son renovables. Si se produce desgaste, todo lo que se necesita hacer es quitar presión de la línea o tubería, desatornillar el bonete de la válvula y cambiar las piezas desgastadas. El cuerpo de la válvula no tiene que ser desmontado de sus conexiones a la tubería.

Cuando una válvula globo se usa en la tubería de alimentación a una caldera, es importante para el flujo de alimentación entrar bajo el disco de la válvula. Si este flujo entra desde arriba y el disco permanece saliendo del tallo o espiga, la válvula podría cerrarse automáticamente, cortándose la alimentación a la caldera. Como se

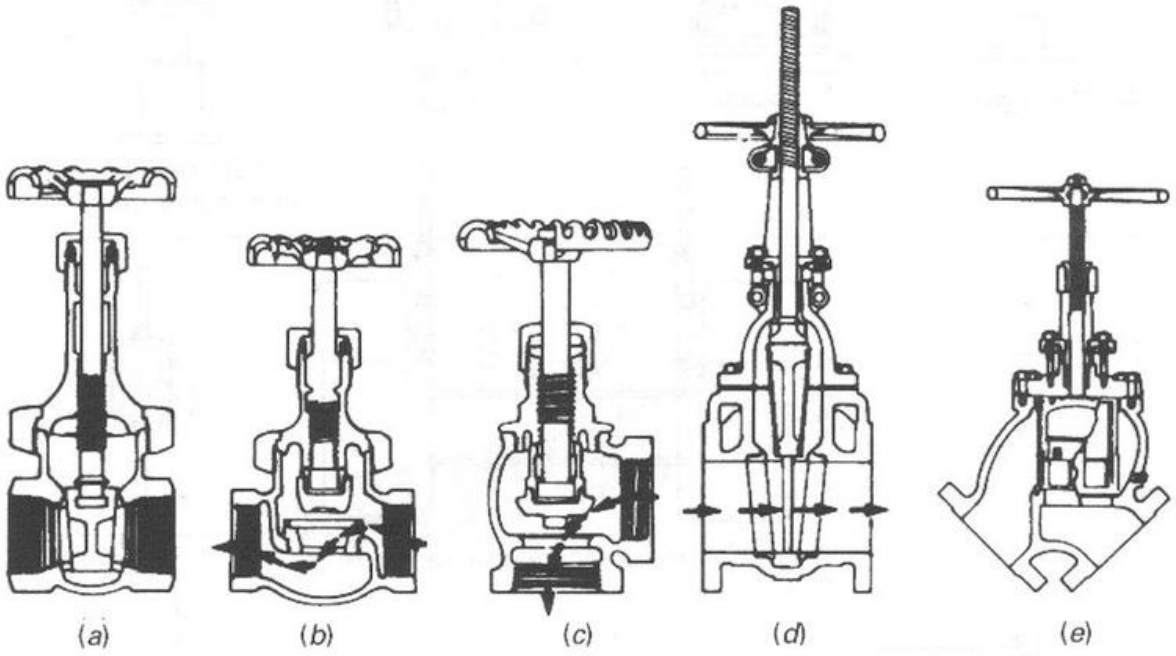


Figura 10.12. Tipos de válvulas. (*a*) Tipo de válvula de compuerta sin espiga roscada sobresaliente; (*b*) válvula de globo; (*c*) válvula en ángulo; (*d*) válvula de compuerta con salida exterior de la espiga roscada; (*e*) válvula antirretorno para línea de vapor. (*Cortesía de Crane Co.*)

ve en la Figura 10.12*b*, el fluido cambia de dirección cuando pasa a través de la válvula de globo. Esta construcción del asiento incrementa la resistencia al —y permite una regulación fina del— flujo del fluido.

El disco y el asiento pueden ser rápida y convenientemente reajustados o cambiados. Esta disposición la hace ideal para servicios que requieren un mantenimiento de válvulas frecuente. El movimiento rápido y corto del disco ahorra a los operarios tiempo cuando las válvulas deben utilizarse frecuentemente.

Las *válvulas en ángulo* (Fig. 10.12*c*) tienen las mismas características operativas que las válvulas de globo. Utilizadas cuando hay un giro de noventa grados en la línea, las válvulas en ángulo reducen el número de juntas y ahorran tiempo de aportación. También proporcionan menos restricción al flujo que la válvula acodada y la de globo, a las que sustituye.

La *válvula de compuerta* puede ser de uno de los siguientes tipos: las de tuerca y compuerta interna, y las de tipo de tornillo y espiga sobresaliente (Fig. 10.12*a* y *d*). Las válvulas de compuerta son las mejores para servicios que requieren una operación no muy frecuente de válvulas y donde el disco se mantiene o totalmente abierto o totalmente cerrado. *No son prácticas para regulación.* Con el tipo normal de válvula de compuerta es imposible conseguir una regulación fina. La velocidad de flujo contra el disco parcialmente abierto puede causar vibración y producir daños en las superficies de asiento. También, cuando está regulando el disco, está sujeto a efectos erosivos severos.

La válvula de compuerta de espita, sin embargo, está muy bien adaptada para el servicio de regulación. La válvula de compuerta trabaja sobre el principio de la cuña con una considerable superficie de contacto del asiento. También, ya que el flujo que la atraviesa es recto, no se ofrece remanso que detenga los sedimentos o trozos de costra. De aquí que las válvulas de compuerta deberían usarse para drenaje de columnas de agua y para servicios similares.

La válvula de espiga roscada saliente se utiliza cuando es prioritario que haya una indicación de que la válvula está en posición abierta. Este tipo de válvula es necesario cuando se usan válvulas de corte en los tubos de unión entre columna de agua y caldera*. Hay disponibles muchas otras modificaciones de las válvulas de globo y compuerta para servicios especiales con diversos fluidos.

Válvulas y accesorios de purga. Se precisa una conexión u orificio de purga en la parte inferior de la calderas y en su generatriz más baja para cumplir con tres propósitos:

1. Eliminar y evacuar los lodos precipitados y restos de escamación.
2. Permitir una bajada rápida del nivel del agua si se ha elevado con exceso accidentalmente.
3. Como medida de eliminación de agua del sistema de calderas de modo que pueda añadirse agua nueva para mantener la concentración de sólidos en la caldera por debajo del punto en que puede haber dificultades.

---

* *N. del T.:* No hay que olvidar las válvulas de cono o esfera de 1/4 de vuelta, que abren o cierran en un giro de 90° y que tienen toda una superficie troncocónica o esférica de contacto y cierre.

Ya que alguna de estas funciones pueden realizarse en condiciones de emergencia, es esencial que las válvulas de purga estén conformadas con arreglo a especificaciones rígidas. Las válvulas de globo no están permitidas bajo ningún concepto por lo inherente a su diseño, debido a la tendencia al remanso o bolsa que se forma, donde se acumulan los sedimentos.

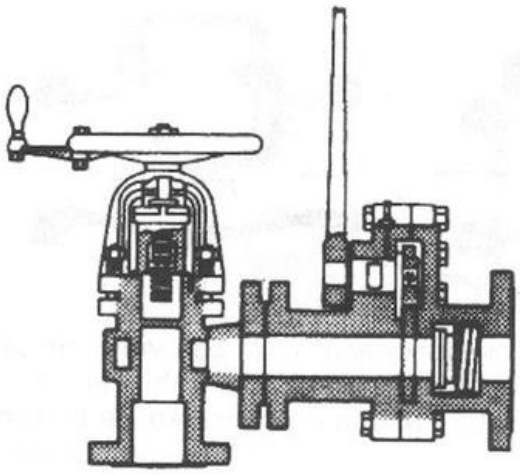
Las válvulas y los accesorios de purga deberían estar diseñados para, al menos, una presión 25 por 100 mayor que la presión admisible en la caldera.

Los accesorios de fundición pueden utilizarse entre la válvula de purga y la caldera para presiones de 100 psi (7 kg/cm^2) o menos, pero son preferibles los accesorios de acero. Éstos están normalizados por los requisitos del código ASME para presiones de más de 100 psi (7 kg/cm^2) y las válvulas de acero para más de 250 psi (17,5 kg/cm^2).

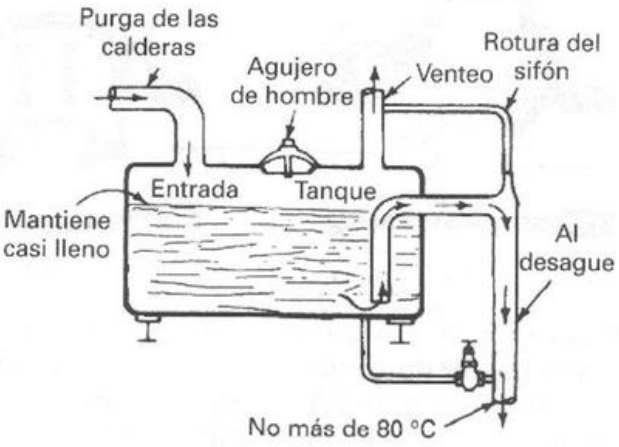
Si la presión excede de 100 psi (7 kg/cm^2), se deberían utilizar al menos dos válvulas de purga (Fig. 10.13*a*). Al menos una de estas dos válvulas debería ser de apertura lenta. El código ASME define la válvula de apertura lenta como aquella que requiere al menos cinco vueltas completas de 360° entre la apertura y el cierre total. Cuando hay más de una conexión de purga en una caldera uniéndose en un colector común de purga, una válvula en cada línea independiente y una válvula maestra en la caldera con los requisitos del código ASME. El código especifica además que una válvula doble de purga en una virola está permitida para que el fallo de una válvula no afecte a la otra.

Es necesario un *tanque o depósito de purga* cuando no hay espacio abierto disponible al cual puedan descargar las calderas su purga, sin peligro de accidentes o daños a la propiedad. Por ejemplo, descargar la purga sobre un sumidero, probablemente dañaría el sumidero por inyectar agua caliente a presión directamente en su interior. Una buena instalación de depósito de purga está siempre casi llena de agua (Fig. 10.13*b*). La asociación NB de inspectores de calderas y recipientes a presión ha publicado las reglas recomendadas para el equipo de purga de calderas, incluyendo métodos para calcular el tamaño del depósito de purga que se necesita para la presión y capacidad de la caldera en consideración. La Figura 10.13*c* muestra los diámetros de tubería recomendados para las conexiones tubulares de la purga, y el tamaño mínimo del depósito basado en toda capacidad de la caldera. El depósito debería diseñarse de acuerdo con la Sección VIII del código ASME de construcción de calderas, para una presión de trabajo de caldera de al menos un 25 por 100 de la presión máxima de trabajo de la caldera a la cual está conectado. En ningún caso, sin embargo, puede ser el espesor de la chapa menor de 3/8″ (9,53 mm).

Válvulas de comprobación. Las *válvulas de comprobación* se utilizan allí donde el flujo unidireccional es fundamental, como cuando el agua de alimentación se introduce en las calderas. El disco oscilante o clapeta de la válvula (véase la Figura 10.14*a* de la página 378) cierra contra su asiento si el flujo tiende a invertirse. Bajando la presión de la tubería y quitando la tapa y la conexión colateral, la válvula y su asiento pueden limpiarse y pulirse para alojar y presentar una cara nueva o un nuevo asiento cuando éste se haya desgastado. También, todas las piezas son renovables. Al ser válvula antirretorno, las válvulas de comprobación se usan para evitar el retroceso en las líneas. En cuanto a principio de trabajo, todas las válvulas antirretorno se conforman con uno de los dos modelos básicos. En la Figura 10.14*a* se muestra



(*a*)



(*b*)

Mínimo diámetro del tubo

Diámetro de purga de caldera, mm	Diámetro de salida, mm	Diámetro de venteo, mm
Mínimo 19	19	50,4
25,4	25,4	65
32	32	75
37	37	100
50,4	50,4	125
65	65	150

Producción de la caldera, kg/hr	Mínimo tamaño del depósito		
	Diámetro, mm	×	Altura, mm
69-690	457,2		610
724,5-1.725	610		762
1.760-3.450	762		914,4
3.485-6.900	914,4		914,4
6.935-13.800	914,4		1.067
13.835-27.600	1.067		1.219,2
27.635-34.500	1.219,2		1.524

Nota: Utilice 34,5 lb/(hr/HP) para convertir a HP.

(*c*)

Figura 10.13. Las válvulas de purga y los depósitos de purga se usan para eliminar sedimentos de las calderas. (*a*) Válvula de purga en ángulo recto y apertura rápida a colocar donde se requieren dos válvulas si la presión es mayor de 100 psi (7 kg/cm^2). (*b*) Los tanques de purga evitan que el vapor o agua caliente vaya a parar a sumideros o espacios abiertos para evitar quemaduras al personal. (*c*) Tamaño de tubos y tanques de purga recomendados por el NB y basados en la potencia de las calderas.

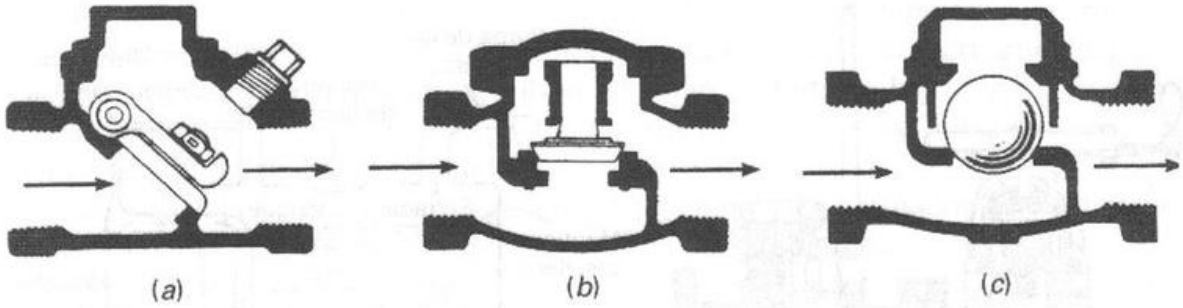


Figura 10.14. Algunos tipos de válvulas de comprobación. (*a*) Las válvulas de disco oscilante tienen una colección reemplazable de arandelas sobre el disco que absorbe la mayor parte del desgaste. (*b*) La válvula de chequeo de pistón se usa para servicio a elevada temperatura, dando un cierre estanco. (*c*) La válvula de chequeo de esfera libre flotante tiene una buen vida de servicio del asiento, ya que la bola nunca se asienta en la misma posición.

el modelo oscilante. El flujo se desplaza a través de estas válvulas en aproximadamente una línea recta comparable a la que tiene la válvula de compuerta. En las válvulas de empuje o de pistón y bola (Fig. 10.14*b* y *c*) el flujo se mueve a través del cuerpo en un camino cambiante, como en las válvulas de globo y de ángulo. En ambos tipos, la oscilante y la de empuje, el caudal mantiene la válvula abierta mientras la gravedad e inversión de flujo la cierran automáticamente.

La precaución fundamental que ha de observarse cuando se instala una válvula unidireccional, sea oscilante o de empuje, es ver que el caudal entra y fluye correctamente; por ejemplo, que el disco se abre con el flujo. Si usted sigue la marca que hay en el cuerpo de la válvula, usted podrá estar seguro de que la válvula está instalada correctamente y que el disco está adecuadamente asentado por el retroflujo o por la gravedad cuando no hay flujo.

PURGADORES DE VAPOR

Los purgadores de vapor deben instalarse en las líneas siempre que el condensado tenga que drenarse tan rápidamente como se acumule y siempre que el condensado deba recobrarse para calefacción, para necesidades de agua caliente o para retornarlo a las calderas (Fig. 10.15). Se produce moho u óxido en las tuberías de vapor, separadores y todo equipo calentado por vapor u operado por él. El objetivo de un purgador es mantener el vapor primero dando el calor de vaporización, cerca de 970 BTU/libras (538 kcal/kg), cortando el flujo de vapor a través del purgador hasta que se condensa, y después abriendo para dejar que el condensado fluya hacia el bucle de agua de la caldera. Esto permite al vapor ceder su energía para realizar trabajo útil y así contribuir a ahorrar costos de combustible.

Otra característica de los purgadores es el venteo incorporado en su diseño de modo que el aire o gases atrapados puedan ventearse del sistema de tuberías vapor-condensado. Este venteo evita:

1. Pérdida de calor transferido porque el aire actúa como un aislante dentro del sistema de tuberías de vapor.

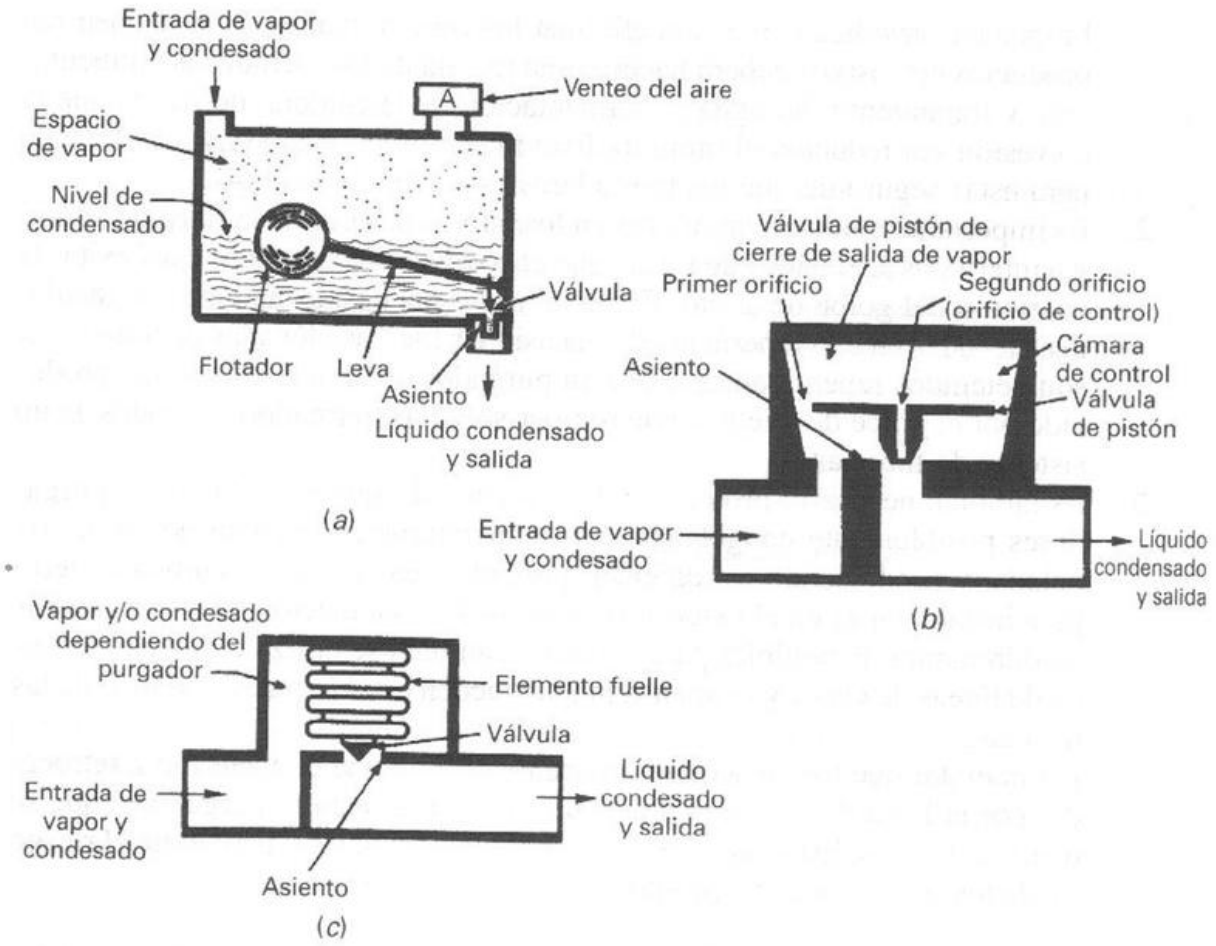


Figura 10.15. Los purgadores de vapor se utilizan para evitar el paso de vapor en una línea o aparato utilizador de vapor hasta que el vapor le cede su calor de condensación y después el purgador se abre para permitir al condensado que fluya a tanques de condensado o depósito de condensado de la caldera. Su modo de operación varía. (*a*) Un purgador de flotador abre y cierra por cambios en el nivel de condensado. (*b*) Los purgadores de pistón utilizan la energía térmica en el condensado caliente y la energía cinética del vapor para abrir y cerrar el purgador. (*c*) El purgador de fuelle (Bellows) es un purgador termostático que tiene un fuelle con un líquido que responde a los cambios de temperatura y así abre y cierra el purgador, usualmente basado en la temperatura de saturación del vapor y la presión implicada. (*Cortesía de Yarway Corp.*)

2. Corrosión por oxígeno dentro del sistema de tuberías de vapor.
3. Acumulación de gases como el dióxido de carbono que puede formar ácido carbónico, que ataca y corroe la tubería metálica de vapor.

Hay muchos tipos de purgadores, como se ilustra en la Figura 10.15. Todos ellos requieren inspecciones periódicas y mantenimiento, porque las siguientes condiciones nocivas afectarán su correcto funcionamiento:

1. Suciedad, óxido, rebabas de soldadura y contaminantes similares del interior del purgador afectarán y limitarán sus movimientos internos. Un modo de evitarlo es instalar filtros delante del purgador. Los filtros tendrán que ser

limpiados periódicamente para eliminar los contaminantes. Si se encuentran productos corrosivos deberá hacerse una revista de los métodos de alimentación y tratamiento del agua de alimentación de la caldera, de forma que la corrosión sea reducida al mínimo. Esto puede requerir también un chequeo para estar seguro de que los purgadores están funcionando.

2. Es importante colocar purgadores en los puntos básicos de la línea de vapor, y a intervalos adecuados de forma que el condensado se separe y así evitar la aparición del golpe de ariete. El vapor y el agua desplazándose a velocidades elevadas en una tubería pueden ocasionar fuerzas elevadas de impacto si son detenidos repentinamente por un purgador o válvula. El choque producido por el golpe de ariete puede romper válvulas, purgadores y codos de un sistema de tuberías.
3. Es también necesario protegerse del condensado que se halla en los purgadores posiblemente congelándose a temperaturas por debajo del punto de helada, y produciendo así daños al purgador. Esto es especialmente cierto para instalaciones en el exterior o edificios sin calefacción. Hay purgadores autodrenantes disponibles para evitarlo. También se utiliza el trazado térmico de líneas de vapor y condensado que pueden estar expuestas al azar de las heladas.
4. Paran evitar que los purgadores cierren y obliguen al condensado a retroceder por la línea de vapor, la práctica moderna es instalar purgadores que se quedan abiertos. Esto puede producir pérdida de energía, pero evita el riesgo de daños por agua en el equipo que se sitúa aguas arriba.

Detección de purgadores con fallos. Los purgadores defectuosos o con pérdidas pueden producir una pérdida de energía junto a probables daños del equipo de proceso. Las inspecciones periódicas son, por tanto, necesarias para asegurarse de estar trabajando según diseño. Los métodos utilizados son:

1. Si la presión del condensado está por encima de la atmosférica, la válvula de ventilación puede abrirse (después del purgador) para ver si el agua o vapor está saliendo. El condensado a temperatura elevada puede vaporizarse instantáneamente; sin embargo, esto puede reconocerse a causa de que el vapor vaporizado normalmente tiene apariencia de nube, mientras que el vapor vivo que ventea no es visible y escapa a gran velocidad. El vapor vivo, por supuesto, significa que el purgador es defectuoso y que necesita comprobación para ser reparado.
2. Los métodos de detección de cambio de ruido o inspección del sonido utilizados incluyen una escucha cuidadosa con una varilla colocada sobre el purgador o utilizando los detectores sónicos disponibles. La mayoría de los purgadores, si están trabajando correctamente, dan un sonido de apertura y cierre a medida que el vapor llega al interior y se permite salir al condensado. Si no están trabajando correctamente, hay un sonido de vapor soplando o silbando a través del purgador sin proporcionar salida al calor de condensación.

El purgador de pistón ilustrado en la Figura 10.15 se usa para servicio de alta presión y está tarado como purgador termodinámico. Al arrancar, como ocurre sobre

una línea de vapor que va a una turbina, la presión creada por el condensado frío empuja el pistón de la válvula, descargando el condensado de la línea de vapor. Cuando la temperatura del vapor y del condensado se aproximan a la de saturación, esto induce al condensado de la cámara de control a vaporizarse instantáneamente («flasheado») y estrangula u obstruye el reflujo a través del orificio de control, aumentando la presión en la cámara de control. Este aumento de presión actuando sobre el área efectiva del pistón con mayor fuerza que la presión atmosférica de entrada, origina el cierre con golpe, y esto evita que el vapor fluya a través del purgador. Cuando el condensado más frío alcanza el purgador, la presión en la cámara de control cae, la vaporización cesa y el purgador reabre y deja al condensado fuera, y así el ciclo vuelve a repetirse.

REGULACIÓN DEL NIVEL DE AGUA Y DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN EN LA CALDERA

La regulación del nivel de agua y del caudal de alimentación puede llevarse a cabo por un regulador autocontenido como se muestra en la Figura 10.16 de la página siguiente. Los controladores de nivel más modernos pueden ser por válvulas controladoras que dependen de sensores para detectar el nivel y después trasferir esta medida mediante señales neumáticas o eléctricas a un actuador o a un microprocesador, que después ajusta el nivel al punto deseado o requerido.

Las calderas viejas están todavía equipadas con reguladores de nivel y alimentadores de agua autocontenidos. Hubo tres clases generales de reguladores de agua de alimentación utilizados para toda clase de tamaños de calderas y de potencias: 1) el regulador mecánico-termostático; 2) el tipo de fluido termostático; y 3) el tipo de flotador o boya.

El regulador de agua de alimentación o de Copes (Fig. 10.16*a*) es de tipo mecánico-termostático. Cada extremo del tubo inclinado está conectado a la caldera; así cuando el nivel de agua en la caldera es normal, el nivel de agua estará por la mitad del tubo inclinado. Debido a la posición inclinada del tubo termostático, una variación de 1″ (25 mm) en el nivel de agua de la caldera producirá un cambio de varias pulgadas en la posición del agua en el tubo. Este hecho hace al regulador extremadamente sensible en su trabajo. Un extremo del tubo está conectado a través de un bielaje y poleas de tracción a la válvula de control de alimentación de agua. A medida que el nivel de agua en la caldera baja, la parte mayor de la longitud del tubo estará expuesta al vapor, se expansiona (dilata) y abre la válvula de control de alimentación de agua. A medida que el nivel de agua en la caldera sube, el tubo se enfría, se contrae y cierra la válvula de alimentación de agua.

El regulador Bailey representa el tipo termostático hidráulico (Fig. 10.16*b*). Se utiliza un tubo termostático inclinado. Este tubo está rodeado por una envolvente o «camisa» aleteada para disipar calor a la atmósfera y hacerlo rápidamente respondiendo a los cambios de temperatura del interior del tubo termostático. La «camisa» o envolvente contiene agua que a través de un circuito cerrado de tubo conecta con un fuelle metálico que está en la parte superior de la válvula controladora de alimentación de agua. Un muelle tiende a equilibrar la válvula contra la presión del fluido

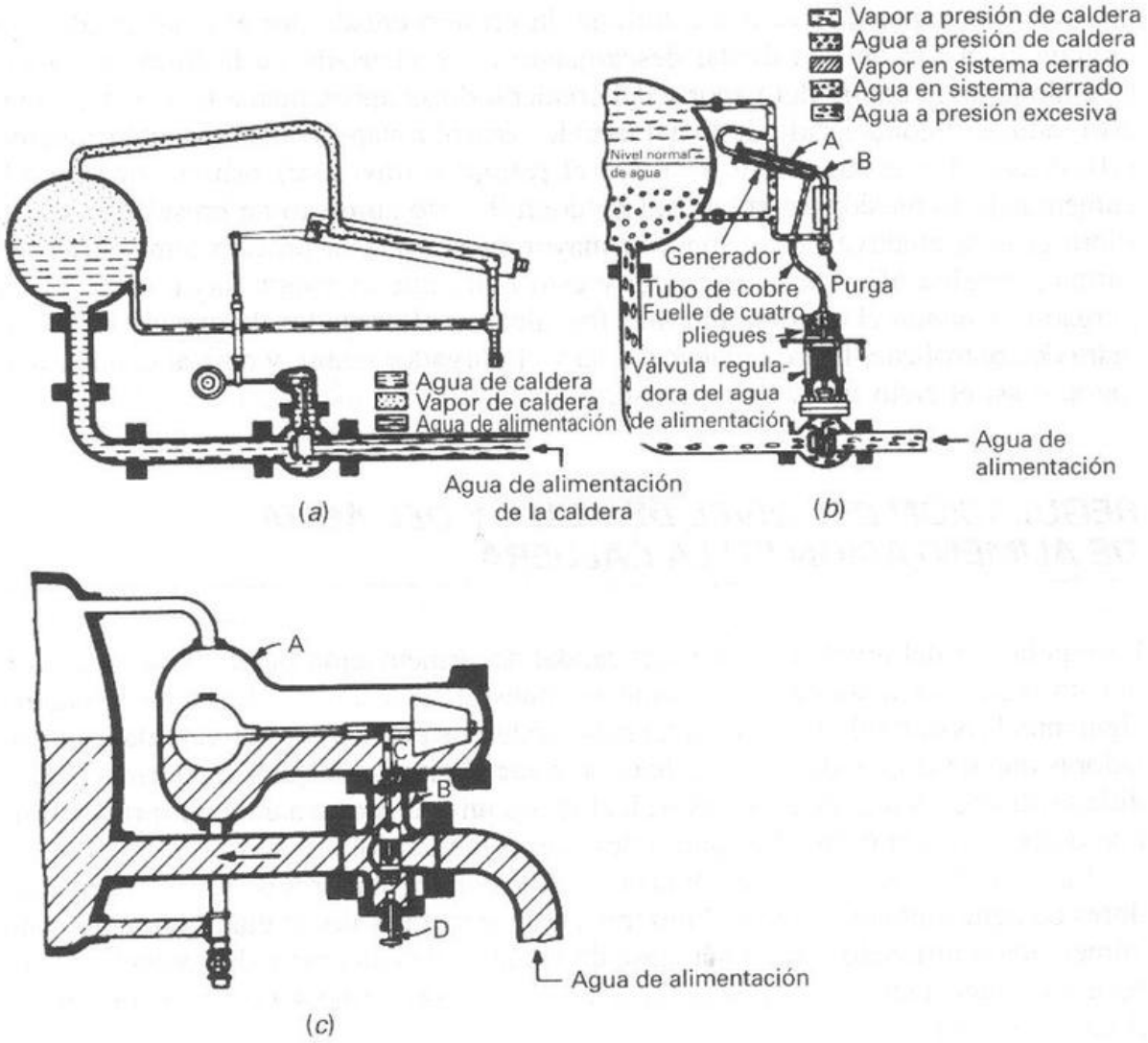


Figura 10.16. Reguladores del agua de alimentación antiguos. (*a*) Tipo Copes. (*b*) Tipo Bailey. (*c*) Tipo Stets. (*Cortesía de Bailey Meter Co.*)

sobre el sifón o fuelle. La posición de la válvula de alimentación de agua está controlada por la presión del fluido producida por los cambios de temperatura y variación del nivel de agua (y espacio de vapor) en el tubo termostático.

El regulador Stets representa el tercer tipo (Fig. 10.16*c*). Aquí, una cámara con flotador está conectada a la misma altura que el nivel normal de agua en la caldera. Un flotador de boya sube y baja con el nivel de agua de la caldera y, a través de un sistema de bielas y palancas, sube y controla la posición de la válvula de de alimentación de agua.

Regulador de alimentación de agua de tres elementos. En un control de alimentación de agua de tres elementos, como se ve en la Figura 10.17, el caudal o flujo de vapor, el caudal de agua de alimentación y el nivel de agua son medidos y registrados por medidores operados mecánicamente. Las medidas de caudal de vapor y de agua están equilibradas una respecto a la otra mediante un embielaje diferencial. Un control piloto está conectado al embielaje de modo que cualquier diferencia entre las

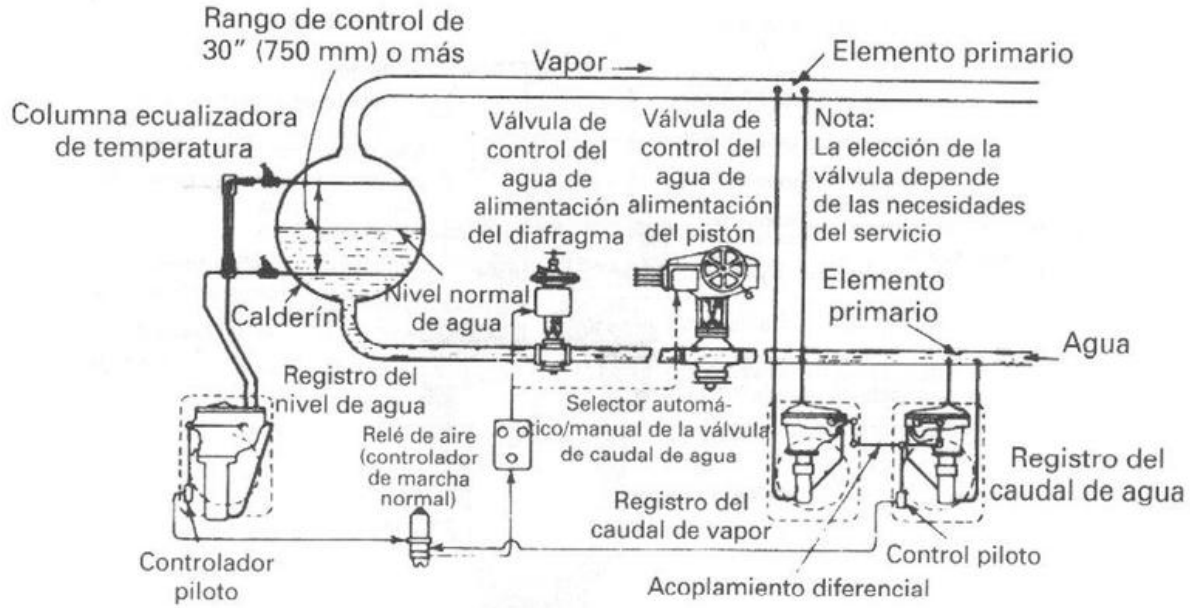


Figura 10.17. El regulador de tres elementos controla el caudal de vapor y agua de la caldera y también mantiene el nivel de agua.

cantidades de caudal de vapor y agua produce un cambio en la señal de salida neumática. Esta señal se transmite a un relé de aire que está combinado con la señal neumática procedente del registrador de nivel de agua.

Un cambio de carga en la caldera desequilibra el embielaje mecánico, produciendo así un cambio en la señal de salida del control piloto. Lo que a su vez cambia la señal de salida del relé de aire. Esta nueva señal reposiciona la válvula de seguridad de control de agua de alimentación, admitiendo el agua necesaria en la caldera, igualando el caudal de agua entrante al de vapor que sale de la caldera. El cambio resultante en el caudal de agua reequilibra el embielaje mecánico diferencial y lleva la señal de control piloto a su punto neutro. Como comprobación final y para asegurar que el calderín tiene el nivel adecuado, la señal del control piloto en el registrador de nivel de agua reajusta el control de la válvula de alimentación, si es preciso. El selector situado en la válvula del sistema proporciona control automático o manual remoto. En condiciones normales de trabajo, el manómetro de control de presión en el selector de la válvula es una indicación de la posición de ésta.

CORTES DE COMBUSTIBLE POR BAJO NIVEL DE AGUA

Un desconectador o corte de combustible por bajo nivel de agua (Figura 10.18 de la página siguiente) separado del control de programación de secuencia, corta inmediatamente la caldera si el agua desciende a un nivel peligrosamente bajo. Los tres tipos existentes son los siguientes:

1. El tipo de flotador magnético (Fig. 10.18*a*) tiene una boya de hierro en un extremo de una varilla. La boya se desliza por el interior de una cubierta no

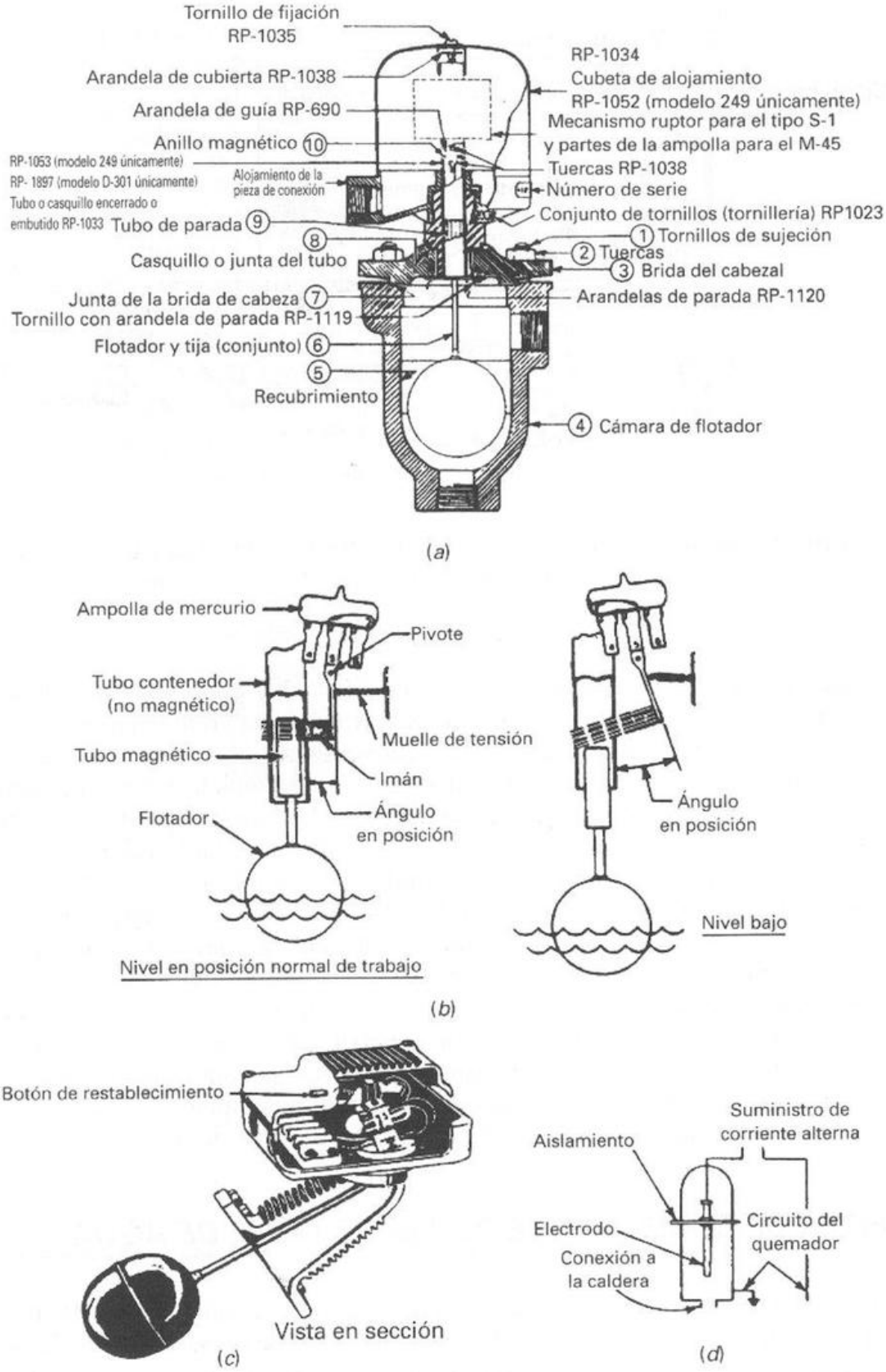


Figura 10.18. Tipos de aparatos de corte de quemador por bajo nivel de agua. (*a*) Tipo de imán flotador LWCO. (*b*) Operación de la ampolla de mercurio en el tipo LWCO de flotador-imán. (*c*) Tipo flotador y embrelaje LWCO. (*d*) Tipo electrodo probeta LWCO. (*Cortesía Magnetrol Corp.*)

ferrosa. Un imán permanente, con una ampolla de mercurio basculante fijada, está soportado por un pivote adyacente a la cubierta no ferrosa. Bajo condiciones normales de agua, la boya de hierro está por encima y fuera del alcance del campo magnético. En esta posición la ampolla de mercurio está en un plano horizontal, manteniendo cerrado el circuito del quemador. Pero si el nivel de agua en la caldera cae, el flotador también cae, llevando a la boya de hierro al interior del campo magnético. Entonces el imán bascula haciendo un pequeño arco hacia la boya y el mercurio de la ampolla bascula, abriendo el circuito del quemador.

2. El tipo de embielaje y flotador (Fig. 10.18*b*) tiene un flotador conectado a través de un embielaje o unión mecánica a una chapa que soporta una ampolla de mercurio basculante. Como la chapa está horizontal en posición normal de nivel de agua, la ampolla de mercurio mantienen el circuito del quemador cerrado. Si el nivel de agua cae, el flotador baja, obligando a la ampolla a abrir el circuito del quemador.
3. El tipo de electrodo sumergido (Fig. 10.18*c*) utiliza el agua de la caldera para cerrar el circuito del quemador. Si el nivel de agua cae por debajo del electrodo, el flujo de corriente se interrumpe, cortando el quemador. En calderas de tubos de humos, el corte por nivel bajo normalmente incluye un conector intermedio que controla la alimentación de la bomba.

El quemador de combustible en caldera operado automáticamente y quemando combustible en suspensión puede quedar expuesto a sufrir daños importantes si hay una interrupción en la alimentación de agua a la caldera. El corte de combustible por nivel bajo es la última defensa contra un posible daño en la caldera por sobrecalentamiento; por otra parte, debería comprobarse y mantenerse en condiciones adecuadas. Para calderas no atendidas, la prueba debería hacerse al menos una vez por semana. Excepto para el tipo probeta, la prueba también debe eliminar cualquier sedimento fuera del recipiente en el que se halla el elemento sensible, por ejemplo un flotador. Con el quemador encendido, la válvula de drenaje de corte por nivel bajo estará abierta y el quemador debería cortar a medida que el nivel de agua cae por debajo de la línea normalmente indicada por el fabricante del aparato de corte por nivel bajo. Si el quemador no corta, se necesita arreglar y dar servicio al mecanismo de corte por nivel bajo. La prueba periódica y la purga del aparato evitarán depósitos, suciedad y óxidos que pueden dar como resultado la restricción del movimiento adecuado del mecanismo de corte por nivel bajo, y así se evitará que esto suceda cuando el aparato esté funcionando en condiciones de bajo nivel de agua.

La combinación del control del agua de alimentación y del corte del quemador por bajo nivel de agua, operando con un sensor o flotador de corte, es muy propenso a desarrollar el bajo nivel de agua si el elemento sensor llega a acumular suciedad y depósitos. Esta condición interrumpe la alimentación y también la protección por nivel bajo de agua. La mayoría de las jurisdicciones exigen un segundo corte de combustible independiente por bajo nivel de agua para evitar que uno de los mecanismos falle y ponga en peligro la caldera con posibles daños serios por recalentamiento, que pueden incluir una explosión de las partes metálicas debilitadas.

Los mecanismos de corte por bajo nivel tipo probeta pueden también ser comprobados si las probetas están montadas en una cámara separada que puede drenarse

independientemente del agua de la caldera. Si está montada dentro de la caldera, deberán seguirse las instrucciones de prueba y mantenimiento.

La mayoría de los mecanismos de corte requieren un desmontaje anual y un programa de limpieza, y esto está normalmente recomendado por los inspectores jurisdiccionales.

Los controles de desconexión por presión y temperatura son utilizados en calderas pequeñas automáticas para hacer el ciclo todo/nada con controles de presión usados en calderas de vapor y controles de temperatura en calderas de agua caliente. Véase la Figura 10.19. Los de límite superior son con rearme manual y son requeridos ahora por el código ASME de calderas, Sección IV, Calderas de Calefacción, y para calderas de alta presión con tasas de combustible de hasta 12.500.000 BTU/hr (3.150.000 kcal/hr), como se estipula en la norma ANSI/ASME CSD, titulada «Controles y dispositivos de seguridad para calderas automáticas». Mientras el control del límite superior, mostrado en la Figura 10.19*c*, es para presión, un control similar de límite superior ,basado en temperatura se aplica para las calderas de agua caliente. Todos los requisitos de la norma ANSI/ASME CSD están cubiertos en el capítulo próximo, como también los requisitos sobre combustión y dispositivos de seguridad de combustión.

Los controles todo/nada se limitan a las calderas de tubos de humos y pequeñas calderas de tubos de agua. Como su nombre indica, una caída de presión actúa sobre un presostato o ampolla de mercurio para arrancar el alimentador o quemador de carbón y abrir la compuerta del aire o a la inversa, cerrar y cortar cuando la presión sube de nuevo. Como el control se limita a variar las duraciones de los períodos de funcionamiento y paro, la eficiencia de la combustión es baja. Un circuito típico de control de combustión para una caldera de calefacción de vapor tiene: control de corte por bajo nivel de agua y control de presión en serie eléctrica. Así, si un control abre, la corriente al motor del quemador se corta. El control principal o primario consta de un relé electromagnético activado por el termostato.

MEDIDA DE CAUDAL

El principio fundamental de la medida de caudal se muestra en la Figura 10.20 de la página 388. La caída de presión a través de un orificio (o placa orificio), en este caso de una línea de vapor, puede medirse conectando un tubo en U a cada lado de la restricción. La presión diferencial resultante es proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido. La situación correcta de los orificios es muy importante. Utilizando una restricción tipo tobera (Fig. 10.20*b*) se obtiene el mejor resultado (mayor presión diferencial para un caudal determinado) cuando las dos conexiones están situadas aproximadamente a un diámetro del tubo aguas arriba y medio diámetro aguas abajo de la cara de entrada de la tobera.

La conversión de una presión diferencial en una señal de salida utilizable puede hacerse de varios modos. Dos elementos secundarios ampliamente utilizados son un manómetro de flotador de mercurio (Fig. 10.20*c*) o un mecanismo de campana Ledoux (Fig. 10.20*d*). En la Figura 10.20*c*, los dos orificios de presión del elemento primario están conectados a dos cámaras de mercurio, unidas por un tubo en U. Las

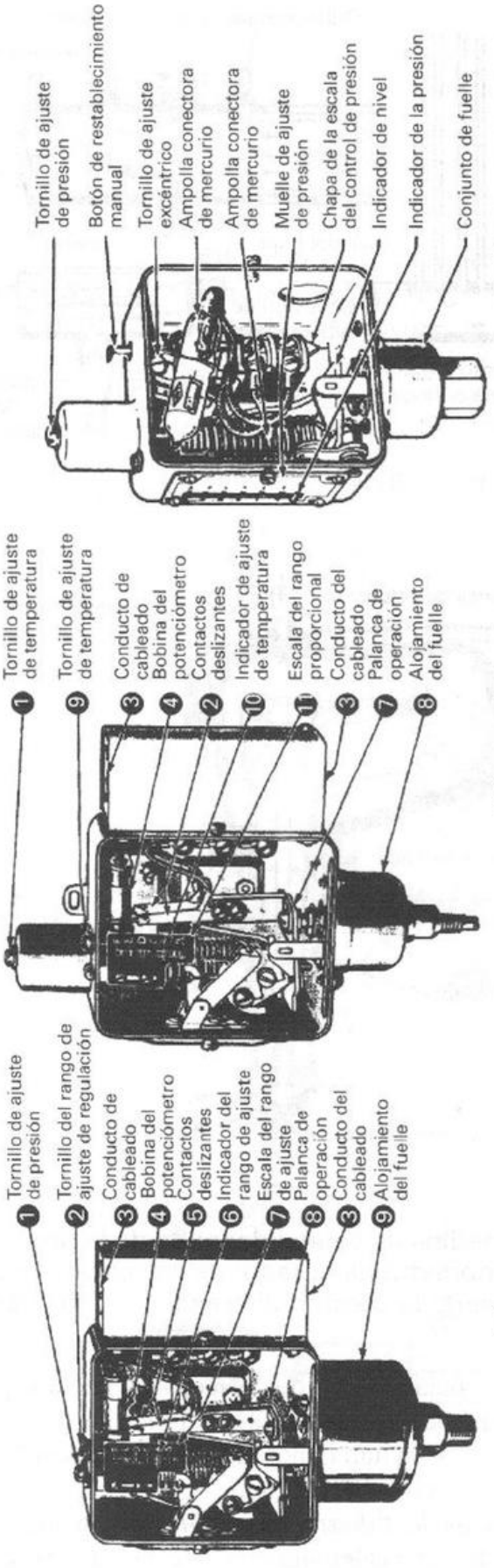


Figura 10.19. (*a*) y (*b*) Controladores de presión y temperatura todo/nada. (*c*) Presostato de límite superior con reenganche manual. (*Cortesía Minneapolis-Honeywell Regulator Co.*)

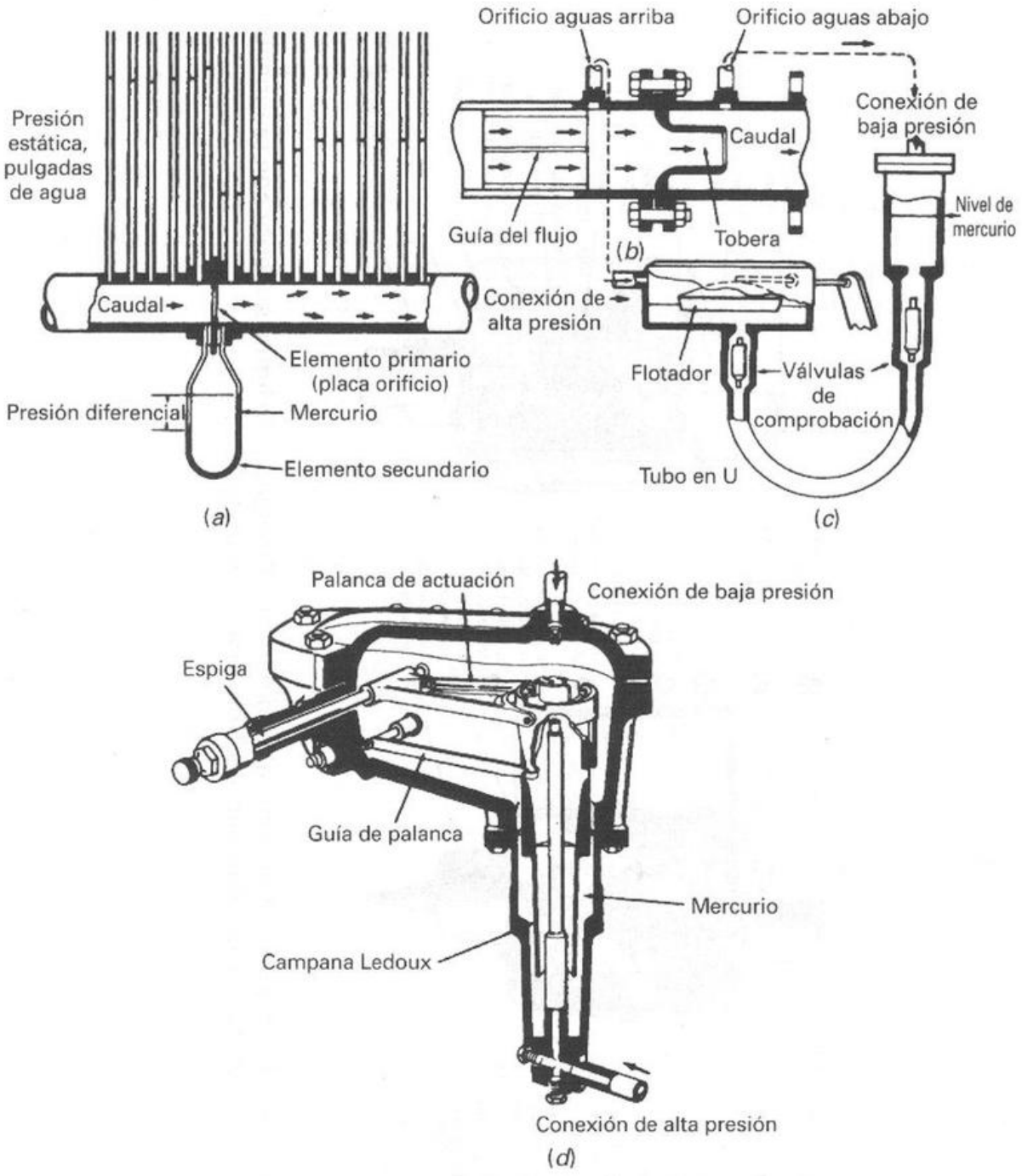


Figura 10.20. (*a*) y (*b*) La medida de caudal depende de la presión diferencial a través de un orificio. (*c*) Manómetro de flotador de mercurio. (*d*) Un mecanismo Ledoux de campana convierte la presión diferencial en una señal de salida.

variaciones de presión suben y bajan el flotador. Un eje estanco a la presión convierte estos movimientos en una respuesta mecánica en el interior del controlador. Sendas válvulas en los dos tubos en U evitan daños al mecanismo resultante de cambios repentinos o retrocesos en la presión diferencial.

Los *elementos auxiliares de la tubería de vapor* pueden incluir una estación reductora de presión y otra de desrecalentamiento, de las cuales se puede obtener menor presión o vapor saturado suministrado por calderas de alta presión.

Estación reductora de presión. Las *válvulas reductoras de presión* conocidas a veces como *reguladoras de presión*, se usan para suministrar vapor a presión constante menor que la de alimentación. Sus aplicaciones incluyen el suministro a procesos de fabricación, alimentación de agua a baja presión o recalentadores de fuel-oil y otras instalaciones auxiliares. Véase la Figura 10.21*a*.

Cuando las calderas de alta presión se usan para calentar aparatos a baja presión a través de una válvula reductora, es necesario resguardar la baja presión de la sobrepresión. Para guardarse de la sobrepresión, es fundamental instalar una válvula de seguridad del lado de la válvula reductora, con capacidad de caudal adecuada para poder absorber la capacidad o caudal de la válvula reductora. El ajuste de presión de la válvula de seguridad estará siempre basado en la presión máxima admisible del equipo más débil del lado de baja presión de la válvula reductora. La válvula de seguridad debería estar tan próxima como sea posible a la válvula reductora. En el caso de que haya varios recipientes en el lado de baja presión de la válvula reductora, no se combinan la totalidad de las válvulas de seguridad de cada recipiente. Deberá asumirse que sólo un recipiente puede estar operativo y, por otra parte, la capacidad total de descarga de todas las válvulas de seguridad puede estar sin protección.

La asociación NB ha diseñado el método siguiente para calcular capacidades requeridas en libras/hora (o kg/hr) en el lado de baja presión de una estación re-

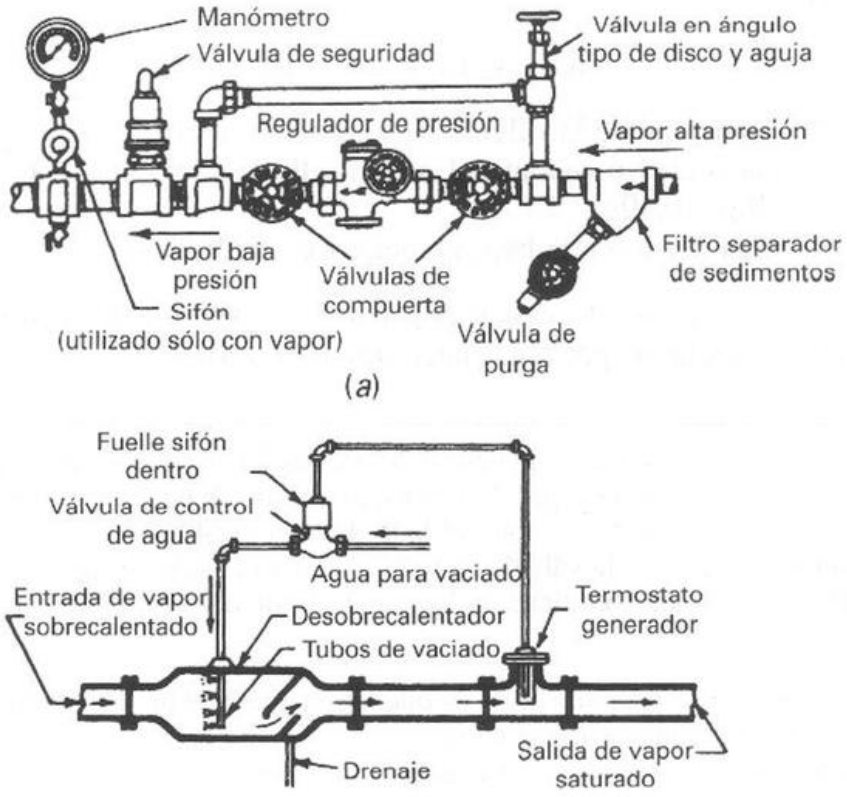


Figura 10.21. Equipos auxiliares de las redes de vapor. (*a*) Disposición de la válvula reductora de vapor. (*b*) Desobrecalentador o desrecalentador de vapor con rociado de agua tratada.

ductora. Estas normas están deducidas de los principios termodinámicos que rigen el flujo a través de una tobera. Ha de suponerse un coeficiente de descarga (alrededor del 70 por 100). Compruebe con el fabricante de la válvula reductora el caudal máximo y después instale una válvula de seguridad de la capacidad recomendada. En lugar de los datos del fabricante, use la siguiente fórmula:

$$\text{RVC} = 1/3 \times \text{OC} \times \text{VSPA} \qquad (10.1)$$

donde: RVC = capacidad o caudal de la válvula de seguridad requerida, libras de vapor/hora (o kg/hr).
OC = capacidad o caudal del orificio, lb de vapor/(hr/in^2) (o kg de vapor/(hr/cm^2) (Fig. 10.22*a*).
VSPA = área de la válvula según tamaño de la tubería, pulgadas cuadradas (o cm^2) (Fig. 10.22*b*).

Cuando una válvula reductora de presión está alimentada con vapor procedente de caldera, la capacidad de la válvula o válvulas de seguridad en el lado de baja presión del sistema no excederá de la capacidad de la caldera, por razones obvias.

La mayor parte de las válvulas reductoras de presión están montadas con una válvula de bypass, que también actúa como fuente de riesgo potencial del vapor en el caso de que se deje abierto el bypass. Cuando se utilice el bypass de la válvula, debería usarse la siguiente fórmula para determinar el caudal de vapor que pasa a través del bypass:

$$\text{RVC} = 1/2 \times \text{OC} \times \text{BPA} \qquad (10.2)$$

donde: RVC = capacidad de la válvula de seguridad, libras de vapor/hora (o kg/hr).
OC = capacidad o caudal del orificio, lb de vapor/(hr/in^2) (o kg/(hr/cm^2) (Fig. 10.19*a*).
BPA = área del tubo de bypass, pulgadas cuadradas (o cm^2).

Deberá utilizarse para seleccionar el caudal de la válvula de seguridad el mayor de los caudales calculados por las ecuaciones 10.1 y 10.2.

Ejemplo. Una válvula reductora no tiene datos de caudal en su placa de características. Su tamaño es de 3″ con presión de vapor de 125 psi en el lado de entrada y 30 psi en el lado de salida. ¿Cuál es la tara real de presión del lado de baja presión conectado al equipo? Determinar el ajuste y caudal de la válvula de seguridad para el lado de baja presión de la línea de vapor si la estación reductora tiene un bypass de 1″ de diámetro. Utilizar los datos de la Figura 10.22.

Solución. Nótese que la válvula de 3″ de diámetro tiene 7,39 in^2 de área interior, mientras que el bypass tiene 0,86 in^2 de área interna.

A través de la válvula reductora, el caudal posible será:

$$\text{RVC} = 1/3 \times \text{OC} \times \text{VSPA} = 1/3 \times 7.200 \times 7{,}39 = 17.736 \text{ lb de vapor/hr}$$

A través del bypass, el caudal posible es:

$$\text{RVC} = 1/2 \times \text{OC} \times \text{BPA} = 1/2 \times 7.200 \times 0{,}86 = 3.096 \text{ lb de vapor/hr}$$

Capacidades o caudales de descarga en lbs/hora y pulgada cudrada para determinar el tamaño apropiado de las válvulas reductoras usadas en el lado de baja presión de las vávulas reductoras

Presión de salida, psi	Presión de entrada a la válvula reductora de presión, psi								
	125	100	85	75	60	50	40	30	25
110	4.550								
100	5.630								
85	6.640	4.070							
75	7.050	4.980	3.150						
60	7.200	5.750	4.540	3.520					
50	7.200	5.920	5.000	4.230	2.680				
40	7.200	5.920	5.140	4.630	3.480	2.470			
30	7.200	5.920	5.140	4.630	3.860	3.140	2.210		
25	7.200	5.920	5.140	4.630	3.860	3.340	2.580	1.485	
15	7.200	5.920	5.140	4.630	3.860	3.340	2.830	2.320	1.800
10	7.200	5.920	5.140	4.630	3.860	3.340	2.830	2.320	2.060
5	7.200	5.920	5.140	4.630	3.860	3.340	2.830	2.320	2.060

(*a*)

Diámetro nominal, pulgadas	Tamaños normalizados		
	Diámetro exterior real, pulgadas	Diámetro interior aprox., pulgadas	Área interna aprox., pulgadas^2
3/8	0,675	0,49	0,19
1/2	0,840	0,62	0,30
3/4	1,050	0,82	0,53
1	1,315	1,05	0,86
1 1/4	1,660	1,38	1,50
1 1/2	1,900	1,61	2,04
2	2,375	2,07	3,36
2 1/2	2,875	2,47	4,78
3	3,5	3,07	7,39
3 1/2	4,0	3,55	9,89
4	4,5	4,03	12,73
5	5,563	5,05	19,99
6	6,625	6,07	28,89
8	8,625	8,07	51,15
10	10,750	10,19	81,55
12	12,750	12,09	114,80

(*b*)

Figura 10.22. Tablas para determinar las capacidades o caudales de las válvulas reductoras de presión. (*a*) Caudal o capacidad en libras por hora y por pulgada cuadrada de área de válvula reductora y presión de entrada y salida. (*b*) Diámetros nominales de tubería estándar, diámetros internos y áreas en pulgadas cuadradas.

La válvula de seguridad tendrá una presión de ajuste de 30 psi (2,1 kg/cm^2) y un caudal de 17.736 Lb/hr (7.981 kg/hr).

Desobrecalentadores (o desrecalentadores). Las grandes unidades de generación eléctrica están diseñadas para operar más eficientemente con un grado de recalentamiento alto. Pero las unidades pequeñas de vapor auxiliar están diseñadas a menudo para trabajar con temperatura de vapor saturado, para la utilización de vapor sobrecalentado requieren más costes de construcción con respecto al beneficio y control de expansión rotatorio que estaría garantizado incluso cuando se compara con la posible reducción de los costos operativos.

Mejor que operar con una línea separada de vapor de la caldera, y estar así más pendiente del sobrecalentador, a menudo es más práctico pasar todo el vapor por el calderín del sobrecalentador (especialmente para el control de temperatura) para uso de los auxiliares. Esta pequeña línea pasa vapor a través del desrecalentador (Fig. 10.21*b*) que rocía una cantidad proporcional de agua tratada en el flujo o caudal de vapor. Esta proporción está regulada de forma que la cantidad de recalentamiento a retirar será igual (o no totalmente igual) a la cantidad de calor necesario para evaporar todo el agua añadida para hacer vapor saturado.

MANTENIMIENTO DE INSTRUMENTOS Y CONTROLES VARIADOS

Las plantas de calderas pueden variar desde las viejas plantas con piezas de mantenimiento simple y fácil hasta las más modernas que utilizan señales digitales para mostrar valores en pantalla con microprocesadores haciendo cálculos para ajustar controles y para mejorar de resultados económicos y operativos. Es esencial para los operadores y personal de mantenimiento, comprender sus sistemas y conocer si son posibles los ajustes por la propia capacidad de la planta. Los dispositivos más comunes encontrados en las plantas más viejas son dispositivos analógicos y controles discretos, definidos como sigue:

1. *Controles discretos* activan dispositivos desde una magnitud singular, como presión, y esta información está conectada y distribuida a una válvula solenoide, válvula reguladora o bobina para una acción que es básicamente todo/nada, arranque/parada o marcha/no marcha.
2. En *controles analógicos*, una cantidad se mide sobre un rango o amplitud de valores dinámicos y las medidas van siguiendo la pista a estos valores y transmitiendo señales a un controlador para cambiar su ajuste de modo que los valores de ajuste deseados se obtienen de modo análogo a los valores deslizantes. Los controles analógicos normalmente son hidráulicos o neumáticos. Los instrumentos para ambos controles, discretos y analógicos, están montados en paneles o cuadros con registradores de valores circulares y diales indicadores para guiar al operador al hacer sus ajustes cuando sea necesario. La llegada de los transmisores electrónicos ha permitido mayores espacios para transmitir los valores medidos desde la zona de operación a las salas centrales de control. Por ejemplo, un voltímetro mostrará tensión en un rango de 0 a 300 voltios sobre un sistema de 250 voltios para que la aguja indicadora se mueva suavemente a medida que el valor cambia.

Los requerimientos de mantenimiento para operarios con dispositivos analógicos están limitados a unos ajustes menores periódicos, si los dispositivos no están sellados, y a un mantenimiento de limpieza y orden de marcha. Las unidades selladas deben sustituirse totalmente si fallan. Los ajustes deberían seguir las instrucciones del fabricante. La comprobación del dispositivo debería realizarse con una fuente de referencia normalizada o test de prueba que dé la lectura exacta que el dispositivo debería tener. Si es necesario, los ajustes tendrán que ser realizados por un técnico cualificado o bien se devuelve el dispositivo al fabricante para su ajuste o reemplazo.

Los dispositivos de control y registro neumático deben también ser mantenidos y comprobados para anotar si funcionan correctamente. Esto incluye a compresores, secadores de aire, depósitos de almacenaje y reguladores de presión. El aire debe mantenerse limpio y seco en todo momento para que los sistemas neumáticos trabajen adecuadamente.

3. *Los dispositivos digitales* cambian los valores mostrados en los equipos e instrumentos en forma de impulsos a partir de una fuente exterior. El valor de un sensor analógico se convierte mediante un pequeño microprocesador o dispositivo similar tipo ordenador en un impulso que puede transmitirse por medio de una baja tensión en el equipo modular en forma digital. Los requisitos de mantenimiento de un equipo digital incluyen la limpieza periódica del sensor para asegurarse de que ningún impedimento pueda afectar su precisión o funcionamiento. La precisión debería comprobarse por medio de una normativa o bien con instrumentos de control fiables. El microprocesador o convertidor de señal no es propenso a deformaciones, y así prácticamente apenas requiere ajustes.

El mantenimiento de los equipos a los que se envían las señales desde el ordenador puede necesitar el apoyo de un elemento electrónico para analizar y localizar defectos en los componentes del equipo o pantalla. Algunos equipos llevan paneles o placas separadas para sustitución inmediata de componentes y reenvío de los defectuosos al fabricante para su reparación o cambio por otros reparados o nuevos. Así se efectúan las reparaciones.

4. *La transmisión de datos* puede ser por: *a*) sistemas de telemetría, comprendiendo un transmisor y un receptor, que requieren suministro de corriente continua. Algunos usan baterías. El suministro de energía necesita comprobación periódica para un funcionamiento correcto. Las líneas telefónicas pueden utilizarse entre el transmisor y el receptor. *b*) Mediante líneas de cable y fibra óptica en paralelo con la utilización de líneas telefónicas. *c*) Mediante otro control remoto de la operación tal como sistemas de radio o satélite. Algunos de sus problemas son la limitación de localización de torres e interferencia de las frecuencias adyacentes que pueden requerir equipos sofisticados de investigación si se presentan problemas.

Todos los equipos de tipo de telemetría necesitan monitorización. Sin embargo, como los equipos son electrónicos, sólo es posible un ajuste muy pequeño, y los «chips» o componentes generalmente se sustituyen. Las unidades transmisora y receptora requieren comprobar la adecuación de su refrigeración. Los reparadores de estos equipos deberán ser personal cualificado. El fallo de un componente es detectable inmediatamente por el fallo en las señales transmitidas.

Sensores y controles. Todo el equipo electrónico y *hardware* que está implicado en un sistema de control depende en su rendimiento de la disponibilidad de los sensores

para medir variables, de su precisión en obtener esta información y transmitirlo a un ordenador controlador programable. Hay muchas magnitudes físicas para cuya medida todavía no se han desarrollado los sensores adecuados. Una de éstas es por ejemplo un lector continuo o registrador del poder calorífico de un combustible. Hay que efectuar otras medidas para compensar esta carencia, de modo que esta información puede utilizarse para regular la entrada de combustible a un sistema de calderas.

La llegada de los circuitos electrónicos de control ha puesto de manifiesto las aplicaciones de esta tecnología a los controles de caldera que están variando continuamente según los métodos de control de caldera. Éstos están siendo acelerados por el desarrollo de sensores más fiables para detectar las condiciones de operación que las calderas, instrumentos y registradores que convierten las «lecturas» de los sensores en señales electrónicas que se transmiten a indicadores remotos, así como a controladores, y que se muestran en pantallas en la sala central de control o en la sala de mando del sistema. Con la llegada del cable de fibra óptica, incluso es posible la transmisión de datos a largas distancias.

Los sensores son dispositivos que tienen la capacidad inherente de monitorizar cambios en el medio que está siendo medido, tal como temperatura, presión, caudal, nivel, tiro, porcentaje de CO_2 y cantidades similares. Los transductores se utilizan para convertir los cambios anotados por un sensor en una señal eléctrica o neumática. Estas señales se envían a los controles, que están tarados o ajustados para regular una cantidad dentro de los límites de ajuste. Las señales se comparan con estos puntos de ajuste y, si es necesario, una señal está ligada a un actuador, de modo que el control del medio se mantenga dentro de los límites de ajuste. Algunos controles incorporan el sensor, el actuador y el traductor en un solo dispositivo de control autocontenido.

La Figura 10.23*b* ilustra cómo un tipo de dispositivo puede transmitir una presión eléctricamente a un equipo indicador registrador y controlador en un punto cercano o remoto usando el equipo de transmisión y además mostrar la presión medida en cada punto y situación. El dispositivo ilustrativo tiene un tubo Bourdon que posiciona un núcleo móvil de un transformador, desde la presión 0 a la de diseño. La posición del núcleo determina la ligazón del flujo magnético entre los arrollamientos primario y secundario, lo que en efecto cambia la tensión en el secundario con las variaciones de presión. Esta tensión puede transmitirse a receptores estándar electrónicos para su uso posterior en aplicaciones de control, registro de datos, entrada al ordenador y aplicaciones similares.

En la figura, la tensión inducida en cada arrollamiento secundario es proporcional al desplazamiento del núcleo desde su posición central; así, la posición del núcleo determina la señal de tensión de salida. Al 100 por 100 de carrera, la tensión E_2 es mayor que E_1, ya que el núcleo está cerca de la parte superior del transformador. Al 50 por 100 de carrera, las tensiones E_1 y E_2 están igualadas, ya que el núcleo está centrado entre los dos arrollamientos secundarios. La tensión de salida en los arrollamientos secundarios puede calibrarse para lectura proporcional de presión en el receptor final.

Las calderas compactas del tipo de tubos de humos generalmente proporcionan funcionamiento totalmente automático con el uso de los controles. El «paquete» estándar incluye una cabina de control compacta que contiene los arrancadores de

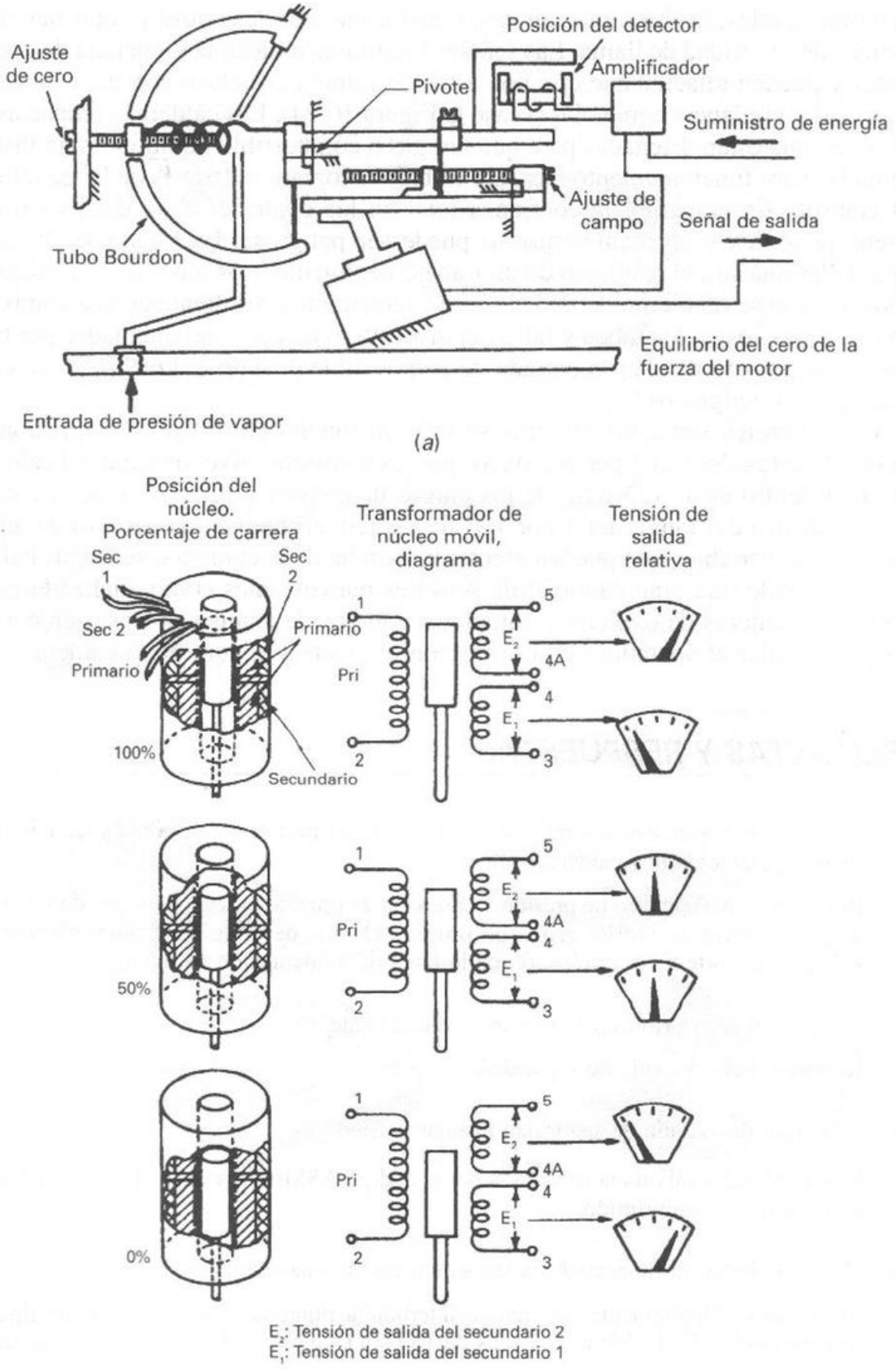


Figura 10.23. Transmisión eléctrica de lecturas de presión. (*a*) Dispositivo a prueba de explosión de tubo Bourdon para salida eléctrica. (*b*) Transformador diseñado para transmitir eléctricamente medidas de presión.

los motores, relés, fusibles, disyuntores, transformadores de control y controles electrónicos de seguridad de llama. Las señales luminosas indican la secuencia de operaciones y pueden relacionarse con una estación remota o incluso con un sistema de seguridad y vigilancia comercial (véase la Figura 10.24). Las calderas compactas de tubos de agua están diseñadas para quemar gas o combustible líquido y están instrumentadas para funcionamiento básico y trabajo automático a través de la tecnología del control. Sin embargo, la confianza total en los controles automáticos sin una prueba periódica y un mantenimiento puede ser peligrosa. La Figura 10.25 de la página 398 muestra el resultado de un trabajo negligente. Los tubos de la caldera de tubos de agua se fundieron debido al sobrecalentamiento resultante de una combinación de depósitos en los tubos y fallo del dispositivo de corte del quemador por bajo nivel de agua para detener la entrada de combustible cuando el nivel de agua cayó hasta niveles peligrosos.

Los controles sobre las calderas se utilizan mucho para regular la presión de vapor y la carga del 1 al 2 por 100 de los puntos de diseño-nivel de agua del calderín de vapor dentro de 1″ (25 mm) de los puntos de consigna, relaciones de aire/combustible dentro del rango del 5 por 100 de los requerimientos del exceso de aire y muchas más variables que pueden afectar la marcha de la caldera o su seguridad. Se ha desarrollado una gran cantidad de sensores nuevos, tales como analizadores de sodio, analizadores de oxígeno y completos equipos de análisis de gases en chimenea para ayudar al operador en la operación eficiente y segura de la caldera.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

1. ¿Cuáles son los accesorios mínimos y dispositivos necesarios para el funcionamiento seguro y fiable de una caldera?

   RESPUESTA: Manómetro de presión y conexión de prueba, válvula de seguridad, válvula de purga, nivel de vidrio, grifos de prueba, válvula de corte en la línea de vapor y válvulas de corte y comprobación en la línea de alimentación de agua.

2. ¿Cuál es el accesorio más importante de una caldera?

   RESPUESTA: La válvula de seguridad.

3. ¿Qué tipo de válvula de seguridad instalaría usted?

   RESPUESTA: La válvula normalizada por el código ASME de resorte directo con descarga por muelle comprimido.

4. ¿Cómo deben estar conectadas a la caldera las válvulas de seguridad?

   RESPUESTA: Directamente sin que se interponga ninguna válvula de ningún tipo. Si sobrepasan los 3″ de diámetro y más de 15 psi (1 kg/cm^2), las válvulas deberán ser de bridas.

5. ¿Cuál debería ser el diámetro máximo para las válvulas de seguridad?

   RESPUESTA: El Código de Calderas específica $4^1/_2$″.

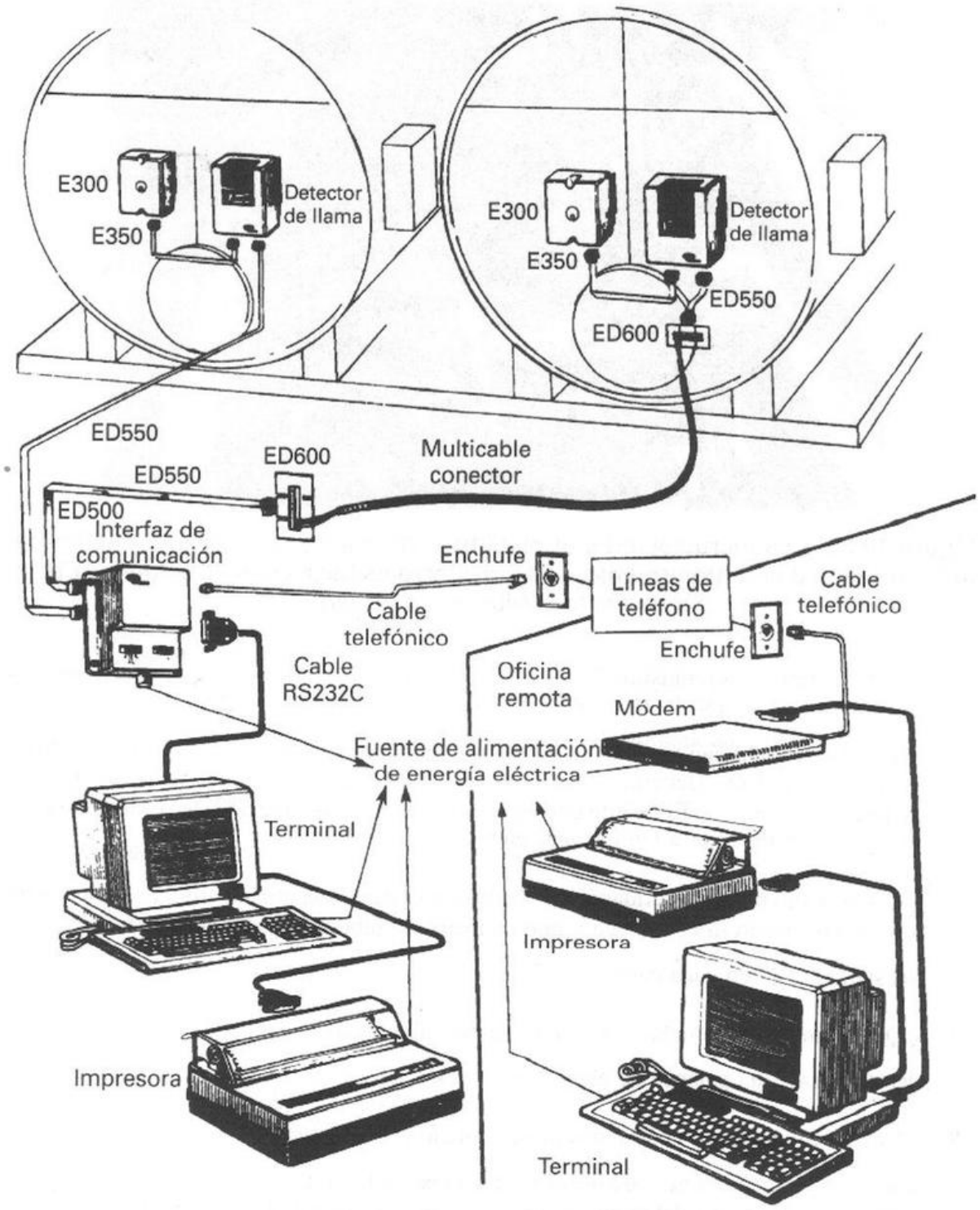


Figura 10.24. Un sistema de gestión del quemador basado en un microprocesador puede interconectarse a un terminal de ordenador, incluyendo oficina remota, y teniendo también un centro de informes y mensajes para visualizar y controlar los distintos límites. (*Cortesía de Fireye Products, subsidiaria de Allen-Bradley.*)

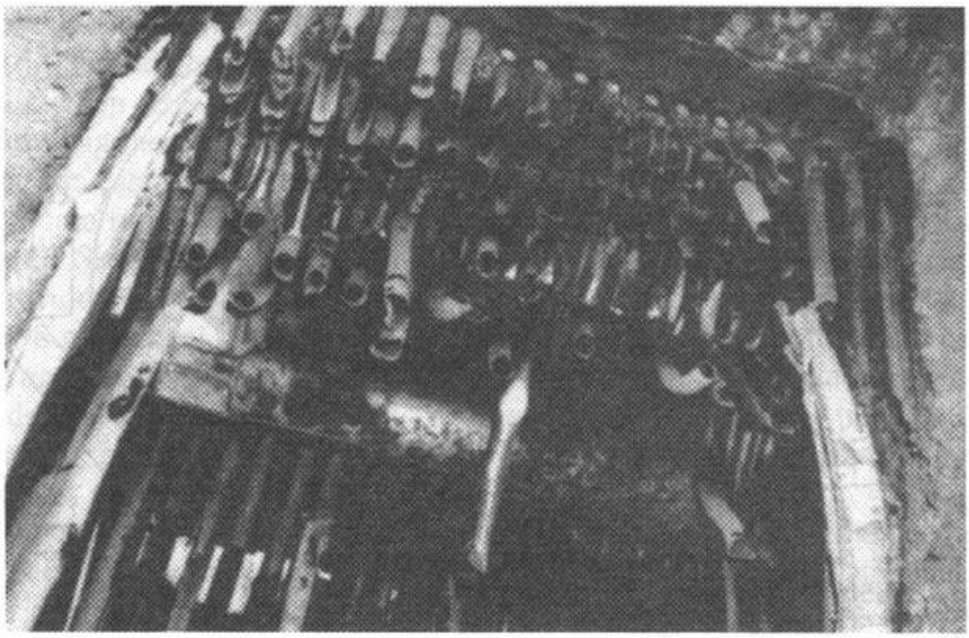


Figura 10.25. La incrustación y el nivel bajo de agua provocaron la fusión del tubo por falta de mantenimiento y de los controles básicos de la caldera. (*Cortesía de Factory Mutual Engineering.*)

6. ¿Como difieren los requisitos de las válvulas de seguridad que descargan vapor sobrecalentado a más de 450 °F (232 °C) de las demás de calderas con calderín de vapor?

RESPUESTA: Deberían tener su conexión por medio de bridas en todos los casos y para todos los tamaños. Deberían estar construidas en acero o aleación adecuada para la temperatura máxima. El resorte deberá ser visible de modo que no esté o pueda estar en contacto con el vapor a temperatura elevada.

7. ¿Con una válvula de seguridad de 4″ de diámetro, cuál es el tamaño mínimo de la tobera o tubo conectado directamente y qué diámetro de tubo de escape debería usarse?

RESPUESTA: 4″ en cada caso.

8. ¿Qué elemento de prueba se requiere en las válvulas de seguridad?

RESPUESTA: Una palanca de elevación (y descarga).

9. ¿Qué se entiende por contrapresión de soplado (en retroceso)?

RESPUESTA: Es el número de libras/pulgada cuadrada (o de kg/cm^2) de caída de la presión de vapor a partir del punto en que la válvula de seguridad abre hasta la presión a la cual vuelve a cerrar.

10. ¿Qué elemento controla la contrapresión de soplado?

RESPUESTA: El anillo de ajuste del soplado (o contrapresión de retroceso).

11. ¿Qué es la cámara de mezcla?

RESPUESTA: Es una cámara que expone el lado inferior del disco de asiento de la válvula, en una válvula de seguridad, a una zona de presión incrementada en su empuje

primario. La presión actuando sobre el área incrementada da como resultado la descarga o empuje secundario.

12. ¿Qué principio de algunas válvulas de seguridad se usa en lugar del área expuesta incrementada por la cámara de mezcla?

RESPUESTA: El principio de reacción.

13. ¿Por qué invertir en la instalación de cámaras de mezcla o reacción del caudal para descargar las válvulas de seguridad?

RESPUESTA: Sin semejante instalación, una gradual elevación y asiento de la válvula arruinaría el asiento de la válvula debido al efecto cortante o de cizalladura del vapor.

14. ¿Cuándo se requiere más de una válvula de seguridad en una caldera?

RESPUESTA: Si la caldera tiene más de 500 pies cuadrados (45 m^2) de superficie de calefacción o más de 500 kilovatios de potencia si se trata de una caldera eléctrica.

15. ¿Cuál es el objeto de la columna de agua?

RESPUESTA: Facilitar la turbulencia del agua entre el calderín y el nivel de vidrio de modo que su nivel pueda determinarse con más precisión.

16. ¿Qué tipo de uniones están permitidas en las conexiones de los tubos a las columnas de agua? ¿Por qué se limita el número de conexiones o uniones?

RESPUESTA: Las de los manómetros, reguladores de compuerta, regulador del agua de alimentación, drenajes, indicadores de nivel o uniones semejantes que se toman como de flujo despreciable. Un flujo apreciable podía falsear la indicación del nivel de agua.

17. ¿Dónde deberá estar situado el nivel de vidrio?

RESPUESTA: En una posición fácilmente visible con su punto inferior o más bajo situado al menos 2″ (50 mm) por encima del menor nivel de agua seguro de la caldera.

18. 1. ¿Qué son los grifos de nivel o grifos de prueba?
2. ¿Cuántos hay y dónde deberían estar?

RESPUESTA:

1. Los grifos de prueba se usan para señalar el nivel de agua en una caldera como comprobación del nivel de vidrio.
2. Dos son los necesarios en calderas de locomotora de hasta 36″ (915 mm) de diámetro o en calderas de hogar interior y caja de fuego de hasta 5 HP. Se necesitan tres en todas las demás calderas de más de 15 psi (1 kg/cm^2) de presión. Estarán localizados equidistantes y dentro del espacio visible del nivel de vidrio de agua. No se necesita probar los grifos si los dos niveles de vidrio están instalados al mismo nivel y separados al menos dos pies (0,6 m) en la caldera.

19. ¿Por qué se necesita drenaje en la columna de agua y por que deberá ser al menos de 3/4″ de diámetro?

RESPUESTA: Para permitir eliminar el sedimento que pudiera bloquear la conexión inferior y producir una lectura o indicación del nivel de agua falsa. Los tamaños inferiores se podrían obstruir más fácilmente.

20. ¿Por qué no es deseable la válvula de globo para control de drenaje de una columna de agua?

RESPUESTA: Porque la compuerta o asiento en este tipo de válvula forma un remanso natural para los sedimentos y suciedad.

21. ¿A qué tres propósitos debe servir una válvula de purga?

RESPUESTA: Eliminación de lodos y sedimentos, control de la concentración de sólidos en el agua de caldera y control de emergencia de niveles anormalmente elevados de agua.

22. ¿Seleccionaría usted codos de fundición o acero en una línea de purga entre la caldera y la válvula?

RESPUESTA: La fundición está permitida hasta 100 psi (7 kg/cm^2). Se precisa acero para todas las presiones por encima de 15 psi (1,05 kg/cm^2).

23. ¿Sobre qué principio operan la mayoría de los manómetros de presión?

RESPUESTA: Sobre el principio del tubo Bourdon; esto es, un tubo curvado tiende a enderezarse cuando se le somete a presión interna.

24. Describa un fusible de caldera.

RESPUESTA: Es una pieza cilíndrica de bronce taladrada y roscada que tiene un núcleo de estaño casi puro. Un fusible se instala en la parte segura y más baja del nivel de agua en algunas calderas de baja y media presión con el circuito final o base taladrada del fusible expuesta a los gases de combustión en su primer paso. A medida que el nivel de agua se aproxima a un nivel peligrosamente bajo, el núcleo está diseñado para que se funda (el estaño) y escape vapor al hogar o caja de humos haciendo ruido y produciendo alarma visual (vapor) y acústica (ruido).

25. ¿Dónde y porqué se precisan aberturas con autocierre sobre las puertas del hogar o caja de fuego?

RESPUESTA: En las calderas de tubos de agua, para evitar que las puertas se abran por un soplido o aumento rápido de la presión positiva de un hogar como resultado de roturas de tubos de agua, explosiones de gas, etc.

26. ¿Dónde y porqué se requiere un sifón en la línea de presión de los manómetros?

RESPUESTA: Es un rabo de cerdo o anillo en la tubería del manómetro, diseñado para retener el condensado y evitar que el vapor vivo entre en el tubo. Esto evita que el tubo, muelles y otras piezas delicadas estén sometidas a temperaturas elevadas.

27. Una caldera de alta presión tiene 2 válvulas de seguridad. ¿Cuál es el rango de ajuste de presiones permitido para éstas.

RESPUESTA:

1. Una de las válvulas de seguridad debe ajustarse a o por debajo de la presión máxima admisible de la caldera.
2. El ajuste de la presión máxima de cualquier válvula de seguridad no puede exceder de la presión máxima de trabajo admisible en la caldera en más de un 3 por 100.

3. El rango de ajuste de presión de todas las válvulas de seguridad de todas las calderas de vapor saturado no podrá exceder del 10 por 100 de la presión más elevada ajustada en la válvula.

28. Una válvula de seguridad en una caldera de vapor de baja presión no tiene tubo de salida de descarga de seguridad. ¿Cuál es el peligro?

RESPUESTA: El trabajo u operación de la válvula puede escaldar a la persona que esté cerca de la salida de la válvula de seguridad y también puede dañar al equipo, como por ejemplo al material eléctrico situado cerca de la salida de la válvula de seguridad.

29. ¿Cómo puede el nivel de agua de vidrio en una caldera indicar un nivel falso de agua?

RESPUESTA: Puede haber obstrucciones en la conexión del nivel de agua, en la columna de agua o en la tubería de conexión de la columna con la caldera.

30. ¿Para qué tipo de instalación de caldera puede cerrarse el nivel de agua de vidrio en funcionamiento?

RESPUESTA: Para calderas con válvulas de seguridad en el calderín ajustadas por encima de 400 psi (28 kg/cm^2) y equipadas con dos indicadores de nivel de agua remotos y fiables; el nivel de vidrio puede cerrarse pero debe mantenerse en condiciones de servicio todo el tiempo.

31. ¿Qué puede inducir al agua en un nivel de vidrio a oscilar arriba y abajo de manera errática?

RESPUESTA: El agua de la caldera puede estar sucia y tener óxidos o escamación flotando, que puede perder constancia y romper el nivel. La purga de la columna de agua de la caldera y la apertura del drenaje del nivel de vidrio eliminarán las posibles obstrucciones de las conexiones del nivel de vidrio. También la comprobación de fugas o pérdidas de la caldera que puedan producir pérdidas de agua y problemas de aportación o alimentación. La sobrecarga en la caldera de manera esporádica puede causar una fluctuación rápida. Si ninguna de estas circunstancias es la causa, la caldera puede requerir una parada para tratar de localizar algún daño interno mediante una inspección.

32. ¿Qué es un purgador y dónde esperaría usted encontrarlo en una instalación de calderas?

RESPUESTA: Es un dispositivo diseñado para separar y retirar el condensado del espacio de vapor con un mínimo de pérdida de vapor. Un purgador se usa a menudo en los puntos bajos de embolsamiento o separadores de aire de las líneas de vapor.

33. ¿Cuál es el concepto de una válvula reductora o reguladora de presión? ¿Dónde encontraría usted alguna?

RESPUESTA: Sirve para reducir una presión disponible a otra menor constante y deseada. Por ejemplo, una línea de vapor que trabaja a 400 psi (28 kg/cm^2) para generación eléctrica tiene que suministrar a un ramal para un calentador tubular diseñado para 75 psi (5,25 kg/cm^2). Una válvula reductora debería instalarse en esa línea para mantener la presión del calentador dentro de los límites prescritos. También se necesitaría en el lado de baja presión una válvula de seguridad ajustada a 75 psi (5,25 kg/cm^2) con una capacidad igual a la de la válvula reductora en libras de vapor/hora (kg de vapor/hora) y un manómetro para señalar si la válvula reguladora está funcionando.

34. ¿En qué tipos de caldera pueden utilizarse las válvulas motorizadas reductoras de presión, y cuál es la definición de una válvula reductora o aliviadora de presión motorizada?

RESPUESTA: Véase la Sección I del código ASME de calderas. Las válvulas monitorizadas reductoras de presión están permitidas en generadores de vapor de caudal o flujo forzado (circulación forzada) sin distinción entre línea de vapor y línea de agua. Estas válvulas se definen como válvulas cuyo movimiento de apertura o cierre está totalmente controlado por una fuente de energía exterior, como aire, vapor o hidráulica. Pueden descargar sobre líneas o secciones de presión intermedias de un generador de vapor de circulación de vapor serie forzada. Están equipadas para abrir por medio de un control de señal de impulsos cuando se alcanza la presión máxima admisible en la salida del vapor sobrecalentado.

35. ¿Pueden incluirse las válvulas de seguridad del sobrecalentador en la capacidad total de descarga requerida para un generador de vapor si se consideran como parte del circuito y caudal de gases de la caldera?

RESPUESTA: Si no hay ninguna válvula entre sobrecalentador y caldera, la capacidad o caudal de las válvulas de seguridad puede incluirse en el total requerido para el generador de vapor; sin embargo, la capacidad máxima permitida del sobrecalentador es 25 por 100 del total requerido para la caldera.

36. ¿Bajo qué condiciones se permiten válvulas de corte en las tuberías de conexión entre caldera y columnas de agua?

RESPUESTA: Siempre que sean válvulas rectas de espiga o varilla saliente o grifos de posición determinada y clara abierta/cerrada. Deberían ser de tipo de cierre/apertura estanca.

37. ¿Por qué se necesitan válvulas de comprobación en la línea de alimentación de agua?

RESPUESTA: Para que la presión de la caldera no fuerce al agua a retroceder en caso de fallo de la tubería; también para ayudar en el funcionamiento de la bomba o inyector de alimentación (en el caso de válvulas antirretorno).

38. ¿Cuáles son el mínimo y máximo tamaños permitidos para válvulas o conexiones de purga?

RESPUESTA: Mínimo: 1″ (25,4 mm) de diámetro; máximo: 21/2″ (63,5 mm) de diámetro, excepto para calderas con superficie de calefacción de 100 pies cuadrados (9 m^2) o menos, donde se permite un tamaño mínimo de 3/4″ (19 mm).

39. ¿Qué son los deflectores y cuándo se necesitan sobre la puerta o compuerta de explosión?

RESPUESTA: Son chapas metálicas colocadas enfrente de las puertas de explosión (o trampillas) de una caldera para desviar cualquier soplido de los pisos o suelos de trabajo, escaleras, plataformas o cualquier otra zona de paso.

40. ¿Qué fuerza opera sobre la compuerta de los purgadores?

RESPUESTA: La gravedad.

41. ¿De qué material están hechos los purgadores y sus flotadores o compuertas?

RESPUESTA: De metal resistente a la corrosión.

42. ¿Por qué un purgador del retorno debe ventear a la atmósfera después de cada descarga?

RESPUESTA: Porque el cuerpo está a una presión mayor que la del retorno del condensado, y el retorno debe mantenerse cerrado. Venteando el purgador a la atmósfera, los retornos pueden fluir libremente en el purgador hasta que oscile y cierre la válvula.

43. *a*) ¿En qué unidades está graduado el vacuómetro.
b) ¿Cuál es la relación entre estas unidades y las libras por pulgada cuadrada (psi)?

RESPUESTA:

a) En pulgadas (o milímetros) de vacío de mercurio (Hg).
b) Cada pulgada de mercurio equivale a 0,49 psi por debajo de la presión atmosférica (14,7 psi (10,29 kg/cm^2) a nivel del mar.

44. ¿Qué es un manómetro compuesto?

RESPUESTA: Uno que dé una lectura positiva de presión en lb/in^2 (kg/cm^2) por un lado y negativa (vacío) en pulgadas (cm) de mercurio por el otro lado.

45. ¿En previsión de qué cuatro detalles de instalación debe hacerse en una línea de vapor que transmite vapor a una distancia considerable de la caldera?

RESPUESTA: Aislamiento, dilatación, soporte y drenajes.

46. ¿Puede incluirse la capacidad o caudal de una válvula de seguridad de sobrecalentador en la capacidad total requerida del generador de vapor?

RESPUESTA: La capacidad o caudal de esa válvula de seguridad no puede incluirse. Nótese, sin embargo, que la capacidad total de la válvula del sobrecalentador debe ser igual a la capacidad o caudal de diseño a través del sobrecalentador. Debe haber en toda salida del sobrecalentador una válvula de seguridad con capacidad no menor del 15 por 100 del total requerido para el recalentador.

47. Una caldera ASME tiene 650 pies cuadrados (59 m^2) de superficie de calefacción. En una caldera construida para 150 psi (10,5 kg/cm^2) la válvula de seguridad está tarada a 100 psi (7 kg/cm^2). Se utilizan dos sistemas de alimentación de agua a caldera, presión unicipal de red a 110 psi (7,7 kg/cm^2) y una bomba. Se desea operar la caldera a 150 psi (10,5 kg/cm^2). ¿Qué recomendaría hacer usted y por qué?

RESPUESTA: Hay que recomendar muelles nuevos para las válvulas de seguridad. Hay que recomendar un medio adicional de alimentación de caldera (bomba o inyector) ya que la presión municipal a 110 psi (7,7 kg/cm^2) no es la adecuada. Los accesorios pueden ser satisfactorios para 150 psi (10,5 kg/cm^2). Se necesitan dos válvulas de purga cuando la presión es superior a 100 psi (7 kg/cm ^{2}). El manómetro frontal deberá tener escala de aproximadamente 250 psi (17,5 kg/cm^2).

48. En una caldera trabajando a una presión de 65 libras (4,6 kg/cm^2), ¿cuál es el menor tamaño de conexiones de alimentación y purga si la válvula de seguridad está cargada a 90 psi (6,3 kg/cm^2)?

RESPUESTA: 1/2″ de diámetro de alimentación de agua; 3/4″ de diámetro de purga.

49. ¿Bajo qué condiciones se permiten válvulas de corte o grifos en las conexiones a la columna de agua?

RESPUESTA: Deben ser del tipo de espiga roscada sobresaliente al exterior (de compuerta) o grifos de cierre con palancas siempre acopladas y señalando con su posición el paso o no paso de agua.

50. *a*) ¿Cuáles son las máximas y mínimas cantidades de purga permitidas en una válvula de seguridad?
b) ¿Como se ajusta ésta cuando es necesario?
c) ¿Qué tolerancia, más o menos, permitiría usted en la presión de apertura de una válvula ajustada para 150 psi (10,5 kg/cm^2)?

RESPUESTA:

a) La purga mínima será no menos de dos libras, y la máxima no inferior del 96 por 100 del ajuste de presión de la válvula de seguridad.
b) Por el fabricante o representante del fabricante solamente.
c) Más o menos un 3 por 100.

51. ¿Cuál es el ajuste permisible del resorte de una válvula de seguridad tarada a *a*) 290 psi de presión (20,3 kg/cm^2); *b*) 190 psi de presión (13,3 kg/cm^2)?

RESPUESTA:

a) 5 por 100 en cualquier caso.
b) 10 por 100 en todo caso.

52. ¿Por qué no debe colocarse la válvula de seguridad en la misma tobera o tubo de la línea principal de vapor?

RESPUESTA: Habría de tener una diferencia de presión (a causa del flujo de vapor en el tubo) entre la presión de caldera y la presión directamente bajo el asiento de la válvula. El flujo de vapor en el tubo ocasionaría el movimiento en el asiento de la válvula y temblores, golpes y daños entre el disco y el asiento cuando la válvula sopla y abre/cierra. Si la caldera tiene un tubo seco, está expuesto a obstruirse, y entonces la válvula no podría soplar para descargar sobrepresión. Es expuesto el instalar una válvula de corte en la línea de vapor entre la de seguridad y la caldera (y además no está permitido por la reglamentación española).

53. ¿Un economizador requiere una válvula de seguridad según el código ASME?

RESPUESTA: Si el economizador va a estar cerrado o separado de la caldera, se necesitarán una o más válvulas de seguridad ajustadas a la presión máxima permitida en el economizador y con capacidades en BTU/hr (kcal/hr) calculadas para la absorción máxima de calor determinada por el fabricante y si la válvula de seguridad está grabada en caudal de vapor, hay que dividir la potencia en BTU de diseño por 1.000.

54. ¿Cuál es la causa de que las válvulas de seguridad pierdan por debajo de la presión de soplado?

RESPUESTA: La pérdida está causada normalmente por asientos dañados, suciedad interpuesta o una presión de trabajo demasiado próxima a la de soplado. Los filtros colocados en el cuerpo de la válvula, la dilatación del tubo o el peso no soportado de la tubería de descarga pueden también originar fugas. Tales fugas pueden detenerse limpiando el

filtro de la tubería de la válvula de seguridad. Las válvulas también fallan en el ajuste de la presión de descarga porque la suciedad o residuos vienen a depositarse entre el alojamiento del disco y su guía o asiento. Los compuestos químicos endurecidos de caldera y depositados en la tobera bajo el asiento pueden también producir fugas o pegado de la válvula.

55. ¿Qué tipo de caldera no necesita nivel de vidrio o grifo de prueba?

RESPUESTA: Los generadores de circulación forzada sin línea fija de vapor y línea de agua (caldera de circulación en serie) y las calderas de agua sobrecalentada o alta temperatura del tipo de circulación forzada. Lo mismo se aplican a las calderas de agua caliente de calefacción de circulación forzada de serie y las calderas de suministro de agua caliente sanitaria que no tendrán línea fija de vapor y de agua (nivel de agua).

56. ¿Qué área de caldera deberá de computarse como superficie de calefacción?

RESPUESTA: El lado o zona de caldera expuesto a los productos de combustión, excluyendo la superficie de sobrecalentamiento. Las áreas a considerar para este propósito son los tubos, cajas de fuego (hogares), virolas, chapas de los tubos (hogares refrigerados) y el área proyectada de los calderines. Para las calderas de tubos de humos verticales de vapor, se computa sólo la parte de la superficie tubular hasta el grifo medio de nivel (nivel medio).

57. Calcular la superficie de calefacción requerida para una caldera de combustible líquido y de tubo de humos con 100 tubos, cada uno de $2^1/_2''$ de diámetro, de galga número 20 de espesor y de 15″ (4,5 m) de longitud. La restante superficie de calefacción de chapa de fuego y chapa de tubos totaliza 130 pies cuadrados a una presión de trabajo de 125 psi (8,75 kg/cm^2). ¿Cuántas y qué tipo de válvulas deberán instalarse?

RESPUESTA: Utilice el diámetro interior de los tubos como determinante de la superficie de calefacción. La transferencia de calor es desde su interior a través del espesor del tubo hacia el lado de agua exterior. La galga 12 de tubo tiene un espesor de pared de 0,105″ (2,66 mm); así, el diámetro interior del tubo será de:

$$2{,}5 - (2 \times 0{,}105) = 2{,}29'' \ (58{,}16 \text{ mm})$$

El área en pies cuadrados de todos los tubos se totaliza por su circunferencia multiplicada por la longitud y por el número de tubos existentes:

$$\pi \ 2{,}29/12 \times 15' \times 100 = 897 \text{ ft}^2$$

Superficie total de calefacción: 897 + 130 = 1.027 ft^2 (92,43 m^2)

Como la caldera tiene más de 500 pies cuadrados de superficie de calefacción, se necesitarán dos o más válvulas de seguridad.

58. ¿Bajo qué otro nombre es conocido el «ordenador basado en chip» y cómo ha afectado este dispositivo a la instrumentación y controles de calderas?

RESPUESTA: El gran crecimiento de la tecnología de los semiconductores ha liderado el desarrollo de circuitos integrados para realizar tareas de control; así, el término «computador basado en chips» se aplicó y después se reemplazó por el término «microprocesador». A medida que estos «chips» fueron disminuyendo más y más de tamaño, los diseñadores de instrumentos y controles pudieron disminuir y/o almacenar más información y control a medida que el almacenamiento de datos crecía en los dispositivos.

Esto ha producido una continua tendencia en las centrales a controlar el equipo de potencia de manera automática por sistemas de ordenador en línea y ha producido el mayor desarrollo del control distribuido, controles «inteligentes» de autodiagnóstico y capacidad de análisis de datos para mantenimiento predictivo. Como puede notarse, la mayor concentración en el uso de instrumentación y controles miniaturizados ha tenido lugar en las centrales de energía con calderas y equipos de generación de energía eléctrica.

59. ¿Qué es una pantalla de gráficos de CRT?

RESPUESTA: Una pantalla de gráficos de CRT (tubo de rayos catódicos o pantalla de TV) muestra al operario de planta una representación gráfica de todo el sistema de energía de planta para monitorizar todos los datos de planta si es necesario para controlar una función, por simple presión sobre un botón o tecla adecuada. Esto ha sustituido los antiguos paneles gráficos de la planta. La facilidad para escanear sobre un gráfico esquemático de planta muestra al operador los valores programados de los puntos monitorizados en los circuitos de potencia de la planta, valores tales como temperatura, presión, caudales, presiones de extracción, cargas sobre el generador y datos operativos similares. Los gráficos de datos pueden operarse en cualquier momento por la acción adecuada del operario en este tipo de operación controlada por ordenador.

60. ¿Con qué frecuencia deben controlarse las columnas de agua y niveles de vidrio en las calderas de alta presión?

RESPUESTA: Para plantas con tres turnos de trabajo, al comienzo de cada turno, y esto debería hacerse por el operario responsable del mantenimiento del nivel adecuado de agua en caldera. Para otras plantas con marcha automática de caldera, el nivel en la columna y de nivel de vidrio debería comprobase al comienzo del trabajo diario.

61. Para una caldera equipada con válvula de purga de apertura rápida y válvula de apertura lenta combinadas, ¿cuál es el procedimiento de purga recomendado para abrir y cerrar las válvulas de purga?

RESPUESTA: Se recomienda que la válvula de apertura rápida sea abierta primero, y la tasa de purga se ajuste con la válvula de apertura lenta. Cuando acabe de purgar, cierre la válvula de apertura lenta primero y la de apertura rápida después. Es también una buena práctica abrir la válvula más próxima al generador de vapor la última y cerrarla la primera cuando se para la purga.

62. ¿Cuál es la disposición de la válvula en una línea de alimentación de agua próxima a la caldera y qué precauciones son necesarias en la entrada del agua de alimentación a la caldera?

RESPUESTA: Se necesita una válvula de corte próxima a la caldera con una válvula de comprobación colocada próxima a la válvula de corte. Toda la línea de alimentación puede cortarse o cerrarse con la válvula de corte si la válvula de comprobación funciona. En otros tiempos se dejaba abierta la línea con la válvula de comprobación (o retención, unidireccional) evitando el retroceso desde la caldera. La descarga de agua de alimentación dentro de la caldera debería hacerse fuera de las superficies calientes para evitar el choque térmico sobre los componentes de la caldera y debería ser por debajo del nivel mínimo de agua.

63. ¿Cuál es el tamaño mínimo de tubo de alimentación requerido para una caldera de tubos de agua (VT) con *a*) 50 ft^2 (4,5 m^2) de superficie de calefacción; *b*) 125 ft^2 (11,25m^2) de superficie de calefacción?

RESPUESTA:

a) 1/2″ de diámetro de tubo.
b) 3/4″ de diámetro de tubo de alimentación.

64. ¿Cuáles son los tamaños máximo y mínimo de abertura para una conexión de purga en una caldera de potencia?

RESPUESTA: Máximo 21/2″ (63,5 mm); mínimo 1″ (25,4 mm); calderas miniatura: 3/4″ (19 mm).

65. Una caldera de vapor pirotubular tiene 95 ft^2 (8,6 m^2) de superficie de calefacción. ¿Cuál es el tamaño mínimo de tubería de purga que se puede utilizar en esta caldera?

RESPUESTA: 3/4″ de diámetro (19 mm).

66. ¿Por qué deberían inspeccionarse los interiores o incluso desmontarse los controles de corte de combustible por bajo nivel de agua al menos una vez al año?

RESPUESTA: Las inspecciones con desmontaje se hacen para comprobar en los siguientes puntos posibles este dispositivo de seguridad, ya que puede quedar fuera de servicio cuando se necesite: 1) conexionado mecánico del flotador, palanca y puntos de pivotaje asociados; 2) partes del embielaje que puedan estar rotas o a punto de romperse, desgastadas u oxidadas; 3) depósitos excesivos de cal o suciedad en el flotador o en su cámara; 4) conexionado de tubería al dispositivo de corte cerrado con sedimentos; 5) flotador con agua en su interior; y 6) puente y conexionado eléctrico recubierto de sedimentos o puenteado parcial o totalmente dando falsas señales eléctricas sobre el bajo nivel de agua.

67. ¿Qué tipo de control de alimentación de agua es especialmente sensible para producir un fallo en el control de bajo nivel de agua?

RESPUESTA: Las unidades con combinación de bomba de retorno y/o alimentador y control de corte por bajo nivel de agua, porque un fallo del flotador hará inútil de inmediato la alimentación de agua a una caldera, así como anulará el corte por bajo nivel de agua a causa del mal funcionamiento de los controles del flotador, ambos, el de alimentación y el de corte de quemador. Un recorte de combustible independiente por bajo nivel debería complementar la combinación de alimentación de agua y corte de combustible por bajo nivel de agua.